



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ**

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**DYNAMICKÁ ZKOUŠKA STANOVENÍ POMĚRU  
ÚNOSNOSTI CBR**

CALIFORNIA BEARING RATIO CBR - DYNAMIC TEST

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Cvečka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| <b>Studijní program</b>        | B3607 Stavební inženýrství                            |
| <b>Typ studijního programu</b> | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| <b>Studijní obor</b>           | 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby                 |
| <b>Pracoviště</b>              | Ústav pozemních komunikací                            |

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

|                        |  |
|------------------------|--|
| <b>Student</b>         | Tomáš Cvečka                                     |
| <b>Název</b>           | Dynamická zkouška stanovení poměru únosnosti CBR |
| <b>Vedoucí práce</b>   | Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.                        |
| <b>Datum zadání</b>    | 30. 11. 2017                                     |
| <b>Datum odevzdání</b> | 25. 5. 2018                                      |

V Brně dne 30. 11. 2017

---

doc. Dr. Ing. Michal Varaus  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti - Proctorova zkouška

ČSN EN 13287-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy - Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání

výzkumné zprávy a studie k danému tématu

odkazy na internetové odborné publikace

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Na vybraném zkušebním vzorku zeminy z podloží vozovky provést porovnání měření a stanovení poměru únosnosti podle ČSN EN 13286-47 a experimentálním způsobem s dynamickým zatížením.

Zhodnotit možnosti použití statického zatěžování při zkoušení CBR a dynamického impulzního zatížení.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Práce je věnovaná tématu využití dynamické zatěžovací zkoušky v silničním stavitelství. Teoretická část se zabývá popisem zkoušky na principy klasické CBR zkoušky s dynamicky působícím zatížením. Část praktická je věnovaná přípravou vzorky zeminy na zkoušku a následným vyhodnocením klasické statické a experimentální dynamické zkoušky na vzorce dvou zemin. Cílem práce je zjistit korelační vztah těchto dvou zkoušek jako i ověřit relevantnost použité zkoušky s dynamickým zatížením.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

kalifornský poměr únosnosti, statická zatěžovací zkouška, dynamická zatěžovací zkouška

## **ABSTRACT**

The work is devoted to the use of dynamic load test in road construction. The theoretical part deals with the description of the test with using classical CBR test with dynamically acting load. The practical part is devoted to the preparation of the soil sample for the dynamic test and following evaluation of the classical static and experimental dynamic method tested on two soil samples. The aim of the work is to find out the correlation relationship of these two tests as well as to verify the relevance of the used dynamic method.

## **KEYWORDS**

California Bearing Ratio, Static Load Test, Dynamic Load Test

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Tomáš Cvečka *Dynamická zkouška stanovení poměru únosnosti CBR*. Brno, 2018. 49 s., 49 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 5. 4. 2018

---

Tomáš Cvečka  
autor práce

## **POĎAKOVANIE**

Touto cestou by som chcel poďakovať Ing. Dušanovi Stehlíkovi, Ph.D. za venovaný čas, ústretovosť, cenné rady, pripomienky pri spracovaní bakalárskej práce a odbornú pomoc v cestných laboratóriách. Taktiež by som chcel poďakovať všetkým pracovníkom cestných laboratórií na ústave pozemných komunikácií FAST VUT v Brne za ich ochotu a ústretovosť.

## Obsah

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.  | ÚVOD A CIELE PRÁCE .....  | 10 |
| 2.  | KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI .....                                 | 11 |
| 2.1 | HISTÓRIA .....  | 11 |
| 2.2 | ÚČEL SKÚŠKY .....   | 11 |
| 2.3 | POSTUP SKÚŠKY .....   | 13 |
| 2.4 | VYHODNOTENIE SKÚŠKY CBR/IBI .....                                 | 15 |
| 3   | KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI – DYNAMICKÁ METÓDA .....              | 18 |
| 3.1 | CIEĽ SKÚŠKY .....   | 18 |
| 3.2 | POSTUP SKÚŠKY .....   | 18 |
| 3.3 | VYHODNOTENIE SKÚŠKY CBR <sub>d</sub> .....                        | 20 |
| 3.4 | ZAHRAŇIČNÉ SKÚSENOSTI S DYNAMICKOU METÓDOU CBR <sub>d</sub> ..... | 21 |
| 4   | KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI – PRAKTICKÁ ČASŤ .....                | 25 |
| 4.1 | SITOVÝ ROZBOR (PODĽA ČSN 73 6133) .....                           | 25 |
| 4.2 | INDEX PLASTICITY (PODĽA ČSN 73 6133) .....                        | 27 |
| 4.3 | ZATRIEDENIE ZEMINY (PODĽA ČSN 73 6133) .....                      | 28 |
| 4.4 | MODIFIKOVANÁ PROCTOROVÁ SKÚŠKA .....                              | 28 |
| 4.5 | SKÚŠKY CBR/IBI .....  | 30 |
| 5   | KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI – DYNAMICKÁ SKÚŠKA .....              | 32 |
| 5.1 | PRÍPRAVA VZORKY .....   | 32 |
| 5.2 | PRÍPRAVA ZAŤAŽOVACEJ SCHÉMY .....                                 | 33 |
| 5.3 | PRIEBEH A ZÁPIS SKÚŠKY .....                                      | 35 |
| 5.4 | VYHODNOTENIE SKÚŠOK .....   | 41 |
| 6   | POROVNANIE VÝSLEDKOV IBI .....                                    | 42 |
| 6.1 | ZEMINA 1 – F6 CL .....  | 42 |
| 6.2 | ZEMINA 2 – F6 CL .....  | 44 |
| 6.3 | VÝSLEDKY POROVNANIA .....   | 45 |
| 6.4 | DISKUSIA .....  | 46 |
| 7.  | ZÁVER .....   | 47 |
|     | POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE .....                                   | 48 |
|     | ZOZNAM OBRÁZKOV .....   | 48 |
|     | ZOZNAM TABULIEK .....   | 49 |



## **Teoretická část**

## 1. ÚVOD A CIELE PRÁCE

Kalifornský pomer únosnosti CBR (California Bearing Ratio) bol vyvinutý pred 2. svetovou vojnou v Kalifornii. Skúška bola určená pre meranie únosnosti podkladových pôd pri výstavbe ciest. V dnešnej dobe CBR slúži ako preukazná a kontrolná skúška pri vyhodnotení únosnosti podložia a konštrukčných nestmelených podkladových vrstiev cestných komunikácií. Pôsobenie na podložie vozovky je, hlavne pri konštrukciách vozoviek menších hrúbok, ovplyvnené aj dynamickými účinkami. Preto použitie dynamickej zaťažovacej skúšky by mohlo pomôcť lepšie vyhodnotiť parametre podložia vozovky. V teoretickej časti sa zaoberám postupom možnej dynamickej skúšky na princípy skúšky CBR. V praktickej časti vyhodnocujem viacero možností riešenia dynamickej skúšky ( $CBR_d$ ). Cieľom práce je porovnanie výsledkov statickej a dynamickej skúšky, ako aj udanie možného vzťahu týchto dvoch skúšok. Taktiež táto práca má overiť relevantnosť použitia tejto skúšky.

## 2. KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI

### 2.1 HISTÓRIA

Kalifornský pomer únosnosti CBR sa prvý krát objavil v roku 1938, čo z neho robí jeden z najstarších postupov definovania únosnosti podložia. Zo začiatku sa používal len pre chodníky, no časom definoval aj tri hlavné zaťaženia, ktoré boli založené na zaťažení náprav (ľahká, stredná a ťažká premávka), kde ale neboli vykonané žiadne osobitné ustanovenia pre počet opakovaní zaťaženia.

V tomto postupe bol materiál charakterizovaný empirickým testom, ktorý má veľmi malý vzťah k podmienkam zaťaženia, ktoré materiál dosiahol v štruktúre vozovky. Test CBR bol po kalibrácii prijatý aj napriek skutočným výsledkom viacerých skúšaných vozoviek. Konštrukčný postup priamo nezahrňuje podmienky prostredia, hoci praktické skúsenosti s obmedzovaním použitia určitých materiálov pri danom prostredí stačia na to, aby sa skúška dala korektne vyhodnotiť. Napríklad pre použitie neošetrených povrchov v oblastiach prudkých dažďov či oblastiach, kde často dochádza k odmäku. [1]

### 2.2 ÚČEL SKÚŠKY

CBR je číslo v percentách, ktoré vyjadruje pomer sily potrebnej k zatlačeniu štandardného trňa za konštantnej rýchlosti do stanovenej hĺbky vzorku skúšanej zeminy, voči sile potrebnej k zatlačeniu toho istého trňa do rovnakej hĺbky vzorku s normovým kamenivom. Normové kamenivo pre túto skúšku je drvený vápenec, ktorý sa nachádza v Kalifornii (CBR = 100%). V Európe je hodnota 100% používaná ako minimálna hodnota pre Mechanicky spevnené kamenivo (MZK).

Výpočtom sa stanoví CBR podľa vzťahu [2]:

$$CBR = \frac{F}{F_s} * 100\%$$

kde:

$F$  je sila potrebná k zatlačeniu trňa do stanovenej hĺbky v skúšanej zemine [kN],

$F_s$  je štandardná sila potrebná k zatlačeniu trňa do stanovenej hĺbky v normovom kamenive [kN].

Tab. 1 Hodnoty štandardných síl pre normové kamenivo [2]

| Penetrácia [mm] | Štandardná sila [kN] |
|-----------------|----------------------|
| 2.5             | 13,2                 |
| 5               | 20                   |

Medzi varianty skúšky CBR patrí v súčasnosti bežné používaná skúška IBI (Immediate bearing index), čo je okamžitá hodnota Kalifornského pomeru únosnosti bez použitia zaťažovacieho prstenca. Hodnota skúšky IBI sa zisťuje krátko po úprave zeminy, čiže napr. po zhutnení do ocelevej formy. V prípade zemín upravených hydraulickými pojivami sa IBI zisťuje do 90 minút po namiešaní zmesi, v prípade použitia vápna nie skôr než o 60 minút.

### Vybrané orientačné hodnoty CBR a IBI [3]:

Tab. 2 Orientačné hodnoty CBR podľa typu podložia

| Miesto                                       | Požiadavka CBR [%] |
|--|--------------------|
| Typ podložia PI, hrúbka hornej vrstvy > 0.5m | ≥ 10               |
| Typ podložia PII                             | 5 – 15             |
| Typ podložia PIII                            | 3 - 10             |

Tab. 3 Orientačné hodnoty CBR podľa skúšanej zeminy

| Zemina   | CBR [%] |
|--|---------|
| Hlina s extrémne vysokou plasticitou (pri optimálnej vlhkosti) | 2 - 5   |
| Štrková hlina (pri optimálnej vlhkosti)                        | 8 – 18  |
| Štrk dobre zrnitý  | 40 - 80 |

Tab. 4 Orientačné hodnoty IBI

| Miesto  | IBI [%] |
|---|---------|
| Rýchla kontrola únosnosti zemín – pojazd bežnou stav. technikou   | ≥ 5     |
| Podložie násypu neupravených zemín – kontrolné a preukazné skúšky | ≥ 5     |
| Podložie násypu upravených zemín – kontrolné a preukazné skúšky   | ≥ 10    |

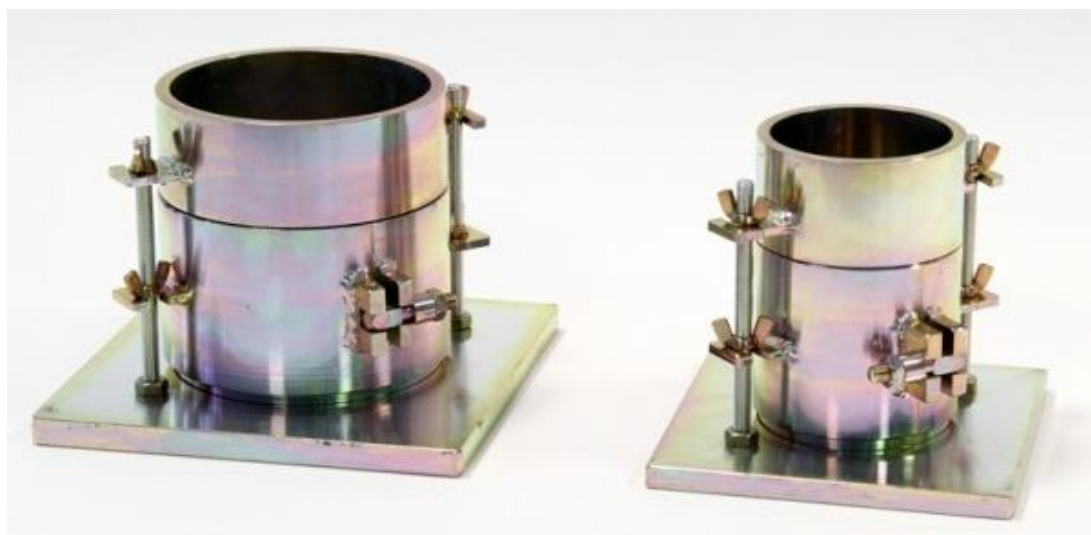
### Parametre použitého zariadenia:

- Proctorová forma pre modifikovanú Proctorovú skúšku s nástavcom typu B, vnútorné rozmery: Ø 150 mm, výška 120 mm, nástavec + 51 mm
- Podkladová doska hrúbky 10 mm
- Plech typu A alebo B, parametre plechu B: hmotnosť 4,5 kg, výška pádu 45,7 cm
- Priťažovacie prstence pre CBR skúšku s hmotnosťou > 4,54 kg
- Penetračný oceľový trň (Ø = 50 mm)

- Zaťažovacie zariadenie (lis) s konštantnou rýchlosťou 1,27 mm/min a silou najmenej 50 kN

## 2.3 POSTUP SKÚŠKY

- **Príprava zeminy:** Pre jednu skúšku treba pripraviť približne 7,5 kg zeminy s najväčším zrnom o priemere 22,4 mm. Zemina sa navlhčí na optimálnu vlhkosť, ktorá sa zistila pomocou Proctorovej skúšky zhutnenia [4] alebo podľa požiadaviek. Ak obsahuje táto zmes ílovité častice, je potrebné nechať zeminu v uzavretej nádobe najmenej 24 hodín z dôvodu zaistenia rovnomernej vlhkosti vzorku v každom jej mieste.
- **Príprava vzorky:** Pomocou Proctorovej modifikovanej skúšky zhutnenia sa vzorka pripraví podľa schémy – predtým ako sa zemina zhutní do formy je potrebné zvážiť používanú formu (Obr. 1), ktorú následne upneme do podkladovej dosky. Na dno formy môže byť uložený filtračný papier pre lepšie oddelenie podkladovej dosky a formy so zeminou. Následne sa v piatich rovnomerných vrstvách (po 56 úderoch) zhutní pripravená zemina baranom o hmotnosti 4,5 kg, ktorý dopadá z výšky 45,7 cm. Pri poslednej vrstve sa na formu nasadí nástavec, aby bolo umožnené vytvorenie



Obr. 1 Proctorová forma [5]

telesa s presným tvarom formy. Po zhutnení sa vrchná strana vzorky škrabkou začistí do úplnej roviny, nech vo vyhodnotení je čo najmenej nepresností. Zbytok pripraveného materiálu sa použije na zistenie vlhkosti vzorky za pomoci sušiarne.

- **Zrenie vzorky:** Používa sa len v niektorých prípadoch. Možno ju realizovať spôsobmi:
  - zrenie pre zamedzenie odparovania (vzorka je uložená napr. v klimatizovanej komore)
  - zrenie umožňujúce úplné nasýtenie vzorky; vzorka je ponorená pod hladinu vody na 96 hodín medzi jednotlivými skúškami CBR
  - zrenie pri zamedzení odparovania po úplnom nasýtení (kombinácia predchádzajúcich spôsobov)



*Obr. 2 Vzorka zeminy v lise*

- **Usadenie vzorky do lisu:** Pred meraním sa vzorka zeminy otočí. Vzorka sa umiestni do stredu zaťažovacieho lisu. Vrchná strana sa osadí zaťažovacím trňom o priemere 50 mm a zaťažovacím prstenci (pri zisťovaní IBI sa prstence nepoužívajú). Lis sa zapne a pomocou ovládacích tlačidiel najprv pre rýchly a potom pre pomalý posun sa nastaví dosadnutie na povrch vzorky (Obr.2).
- **Meranie:** Ak sú očakávané hodnoty CBR/IBI menšie než 5% , prevedie sa dosadnutie na povrch vzorky o sile 10 N, inak 40 N. Po dosadnutí trňa sa odchýlkomer nuluje.

Nasleduje spustenie merania, lis pôsobí na vzorku konštantnou rýchlosťou 1,27 mm/min. Počas merania sa zapisuje sila pri zatlačení do zeminy každého 0,5 mm. Meranie končí, keď sa trň zaborí do vzorky o 10 mm.

- **Príprava vzorky pre zrenie:** Proctorová forma so zeminou sa upevní na podkladovú dosku skúšanou časťou vzorky smerom dole a osadí sa nástavcom. Celá zostava sa umiestni do nádoby, kde sa celá vzorka ponorí do vody. Počas zrenia sa osadí na vrch vzorky prstenec na priťaženie, ktorý počas zrenia simuluje konštrukciu vozovky. Na nástavec sa umiestni trojnožka s uchyteným odchýlkomerom pre meranie lineárneho napúčania a odčíta sa meranie  $h_0$ . Po 96 hodinách sa odčíta meranie  $h_1$  a prevedie sa skúška CBR.
- **Vyhodnotenie skúšky:** Stanovia sa hodnoty  $CBR_{2,5}$  a  $CBR_{5,0}$ , pričom v záverečnom protokole je nutné uviesť na akú vlhkosť bola zemina vlhčená.

## 2.4 VYHODNOTENIE SKÚŠKY CBR/IBI

Na základe nameraných hodnôt v závislosti síl na penetráciu (po 0,5 mm) sa vytvorí grafická závislosť (obr. 3).

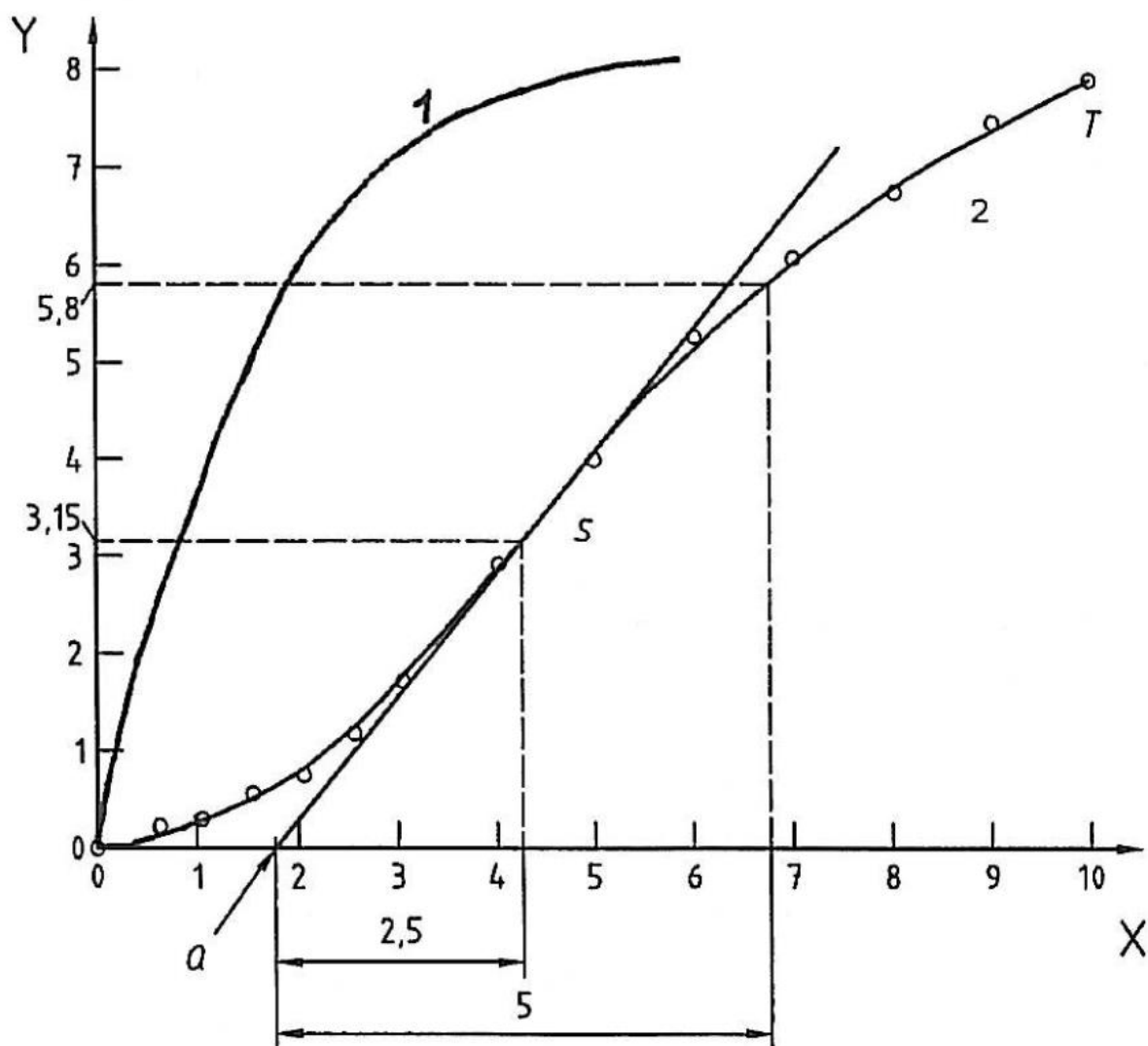
V grafickom vykreslení závislosti sily na penetráciu môžeme pozorovať:

Krivka č. 1 – Ide o štandardný typ krivky, ktorý je konvexný vo smere osi x a nevyžaduje žiadnu korekciu (podľa 10.1.2)

Krivka č. 2 – Ak je počiatočná časť krivky konkávna v smere osi x, zvolí sa priesečník tejto tangenty a osi penetrácie za nový začiatok bod Q (viz. obr. 3). Táto situácia môže nastať napr. v dôsledku nerovného povrchu. Vtedy sa prevedie oprava vytvorením tangenty v bode najväčšieho sklonu (v inflexnom bode tejto krivky S) (podľa 10.1.3)

**Výpočet CBR/IBI:** Sily zodpovedajúce pri penetrácii 2,5 mm a 5 mm sa odčítajú z tabuľky (grafu) a následne sa vyjadria v percentách v pomere ku referenčným silám týchto penetrácií, tj. 13,2 a 20 kN. Vyššie percento je hodnotou CBR/IBI.

POZNÁMKA: Skúška CBR sa nemá riešiť pri penetráciách väčších než 7,5 mm. Ak budú dosiahnuté opravené hodnoty penetrácie 5 mm väčšie než 7,5 mm, musí byť oprava urobená z penetrácie 7,5 mm



**Legenda:**

|   |                 |   |                                    |
|---|-----------------|---|------------------------------------|
| Q | nový počiatok   | 1 | štandardný typ krivky podľa 10.1.2 |
| X | penetrácia v mm | 2 | typ krivky podľa 10.1.3            |
| Y | sila v kN       |   |                                    |

Obr. 3 Grafické vykreslenie závislosti sily na penetráciu trňa [2]

**Záznam výsledkov CBR/IBI:** Hodnoty CBR/IBI sa zaznamená spôsobom podľa tabuľky 5:

Tab. 5 Zaokrúhľovanie hodnôt CBR/IBI [2]

| Rozmedzie CBR/IBI | Zaokrúhlené v % |
|-------------------|-----------------|
| 0 – 9             | 0,5             |
| 10 – 29           | 1               |
| >29               | 5               |



### Výpočet CBR pre krivku 1:

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 2,5 mm je 6,9 kN.

$$CBR_{2,5mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{6,9}{13,2} * 100 = 52,3\% \approx 50\%$$

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 5,0 mm je 8,0 kN.

$$CBR_{5,0mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{8,0}{20,0} * 100 = 40,0\% \approx 40\%$$

Hodnota CBR pre krivku 1: **50%**

### Výpočet CBR pre krivku 2:

Oprava penetrácie  $\Delta p = 1,7 \text{ mm}$

- Sila zodpovedajúcej penetrácii trňa do hĺbky 2,5 mm:

$$2,5 \text{ mm} + \Delta p = 2,5 + 1,7 = 4,2 \text{ mm} \rightarrow 3,15 \text{ kN}$$

$$CBR_{2,5mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{3,15}{13,2} * 100 = 23,8\% \approx 24\%$$

- Sila zodpovedajúcej penetrácii trňa do hĺbky 5,0 mm:

$$5,0 \text{ mm} + \Delta p = 5,0 + 1,7 = 6,7 \text{ mm} \rightarrow 5,8 \text{ kN}$$

$$CBR_{5,0mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{5,8}{20,0} * 100 = 29,0\% \approx 29\%$$

Hodnota CBR pre krivku 2: **29%**

### 3 KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI – DYNAMICKÁ METÓDA

Statické zaťažovacie skúšky sú dnes bežne používané na zistenie odolnosti zemín z hľadiska únosnosti. Pri niektorých vozovkách nastáva však problém s veľkým dynamickým zaťažením na podložie vozovky. Ide hlavne o konštrukcie vozoviek menších hrúbok, napr. konštrukcie účelových komunikácií, ktoré nie sú navrhované na veľké zaťaženia. Pre tieto prípady má zmysel sa zamyslieť nad používaním *dynamickej metódy Kalifornského pomeru únosnosti (CBR<sub>d</sub>)*.

#### 3.1 CIEĽ SKÚŠKY

Cieľom experimentálnej dynamickej skúšky na princípy CBR je zistiť koreláciu výsledkov so statickou skúškou CBR a zistiť relevantnosť a vhodnosť použitia tejto skúšky CBR<sub>d</sub>.

##### Parametre použitého zariadenia:

- Proctorová forma pre modifikovanú Proctorovú skúšku s nástavcom, vnútorné rozmery: Ø 250 mm, výška 200 mm
- Pech typu A alebo B, parametre pechu B: hmotnosť 4,5 kg, výška pádu 45,7 cm
- Penetračný oceľový trň (Ø = 50 mm)
- Zariadenie s dynamickým impulzným zaťažením s možnosťou odľahčenia vzorky

#### 3.2 POSTUP SKÚŠKY

- **Príprava zeminy:** Pre jednu vzorku zeminy skúšajúcej na dynamické účinky je potrebné pripraviť si približne 23 kg zeminy normálnej vlhkosti (hmotnosť vzišla z objemu formy). Zemina sa následne navlhčí na optimálnu vlhkosť, ktorá sa zistila pomocou Proctorovej skúšky zhutnenia [4] alebo podľa požiadaviek. Špecifikácie zeminy, ako je napr. najväčšie možné zrno, zostávajú rovnaké ako pri vyhodnotení klasickej CBR skúšky.
- **Príprava vzorky:** Pomocou špeciálnej skúšky na báze Proctorovej modifikovanej skúšky sa vzorka pripraví podľa schémy - použije sa forma vo väčšom objeme (dôležitá je hlavne väčšia šírka – obr. 4) ako pri modifikovanej Proctorovej skúške. Dôvodom je roznos dynamického zaťaženia na vrstvy zeminy. Podľa vzorca sa určí energia vykonaná v statickej skúške CBR.

$$E = \frac{m * g * h * n * u}{V}$$

kde:

$E$  je energia dodaná zemine pomocou barana [J],

$m$  je hmotnosť barana [4,5 kg],

$g$  je gravitačné zrýchlenie [9,81 kN/m<sup>2</sup>],

$h$  je výška, z ktorej dopadá baran na zeminu [45,7 cm],

$n$  je počet opakovaní úderov,

$u$  je počet dopadnutí barana počas jedného opakovania,

$V$  je objem formy [m<sup>3</sup>].



*Obr.4 Zemina hutnená do formy*

Aby bolo zachované množstvo energie dodané zemine pri dynamickej skúške, musí sa zväčšiť súčin počtu opakovania  $n$  a počtu úderov  $u$ , priamo úmerne objemu  $V$ .

- **Usadenie vzorky do lisu:** Pripravená vzorka sa umiestni do stredu zaťažovacieho prístroja. Prístroj sa nastaví tak, aby spodná plocha zaťažovacieho prístroja dosadala na zarovnanú plochu zeminy (obr. 5).

Ak je vyriešený spôsob odčítania deformácie, po dosiahnutí styku prístroja (alebo jeho nástavca) s hladinou zeminy vo forme sa môže začať samotné meranie.

**Meranie:** Spočíva v pravidelnom priťahovaní a odľahčovaní prístroja na povrch zhutnenej zeminy. Doba priťaženia je totožná s dobou odľahčenia. Na základe vzorca pre výpočet energie sa určí počet opakovaní v jednom cykle a počet cyklov v meraní. Na začiatku každého cyklu sa zvyšuje sila (napätie), ktorá vzorku priťahuje o daný prírastok zaťaženia pre nasledujúci počet opakovaní v cykle,

$$F_{n+1} = F_n + x$$

$$F_{n+2} = F_n + 2x = F_{n+1} + x$$

kde:

$F_n$  je počiatočná sila,

$F_{n+i}$  je zväčšená sila, v  $i$ -tom cykle,

$x$  prírastok zaťaženia na zhutnenú vzorku.

Prírastok  $x$  sa behom merania nemení, aby sa zachovalo lineárne zvyšovanie zaťaženia na povrch zeminy.



*Obr. 5 Skúšobné teleso v zaťažovacom prístroji*

### 3.3 VYHODNOTENIE SKÚŠKY $CBR_d$

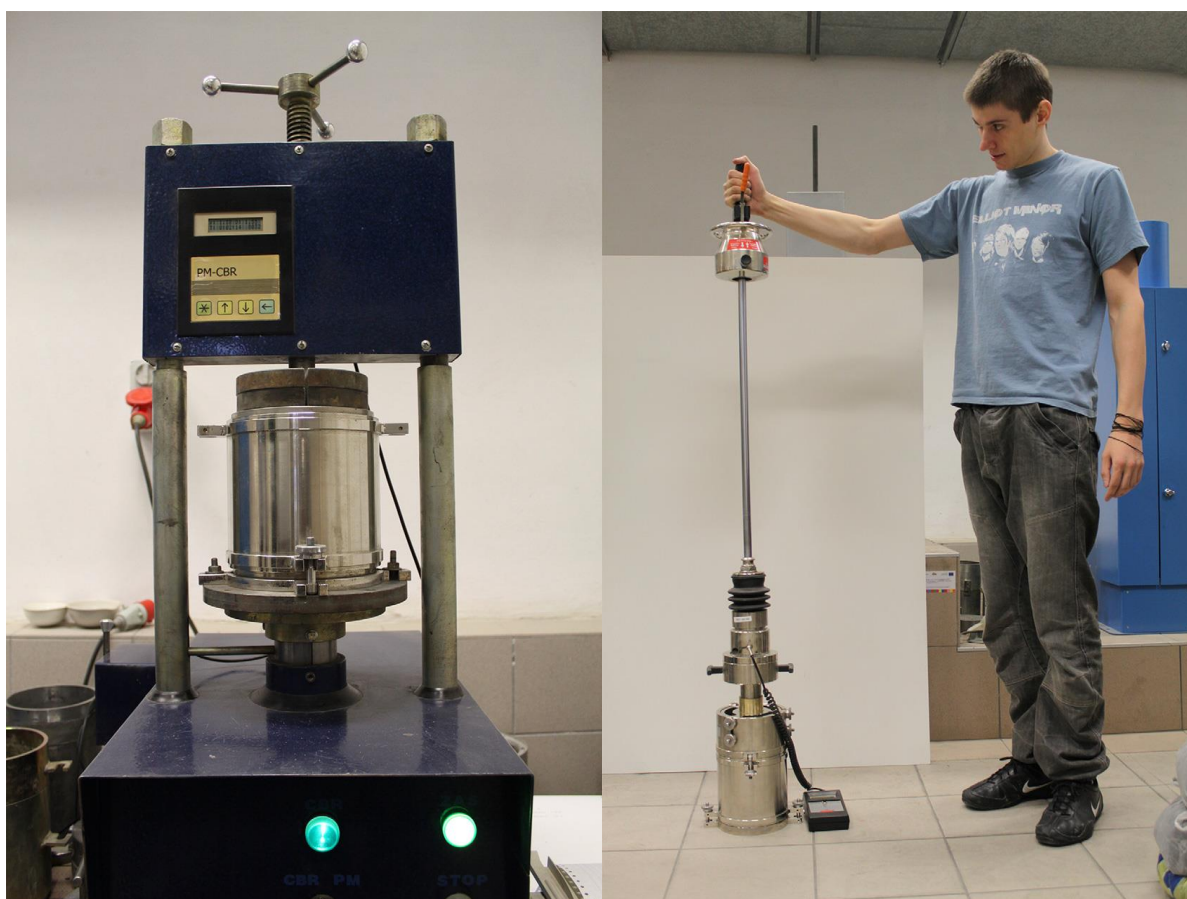
Vyhodnotenie skúšky  $CBR_d$  je predmetom práce.

### 3.4 ZAHRANIČNÉ SKÚSENOSTI S DYNAMICKOU METÓDOU CBR<sub>d</sub>

Podľa pokusu [6], ktorý bol publikovaný v časopise *Journal of Testing and Evaluation* a bol vedený dvoma vedkyňami z Technickej Univerzity v Bialystoku v Poľsku (*The Bialystok University of Technology*) sa dá určiť predpokladaný výsledok tejto experimentálnej skúšky. Tím vedcov (Prof. Katarzyna Zabielska-Adamska a Maria Jolanta Sulewska Ph.D.) porovnávala pôsobenie statického a dynamického zaťaženia na vzorku zeminy. Zemina obsahovala isté množstvo popolčeka z tepelnej elektrárne v Bialystoku. Tento pokus bol riešený aj za účelom experimentu skúšania popolčeka daného zloženia, ale to nie je predmetom tejto práce.

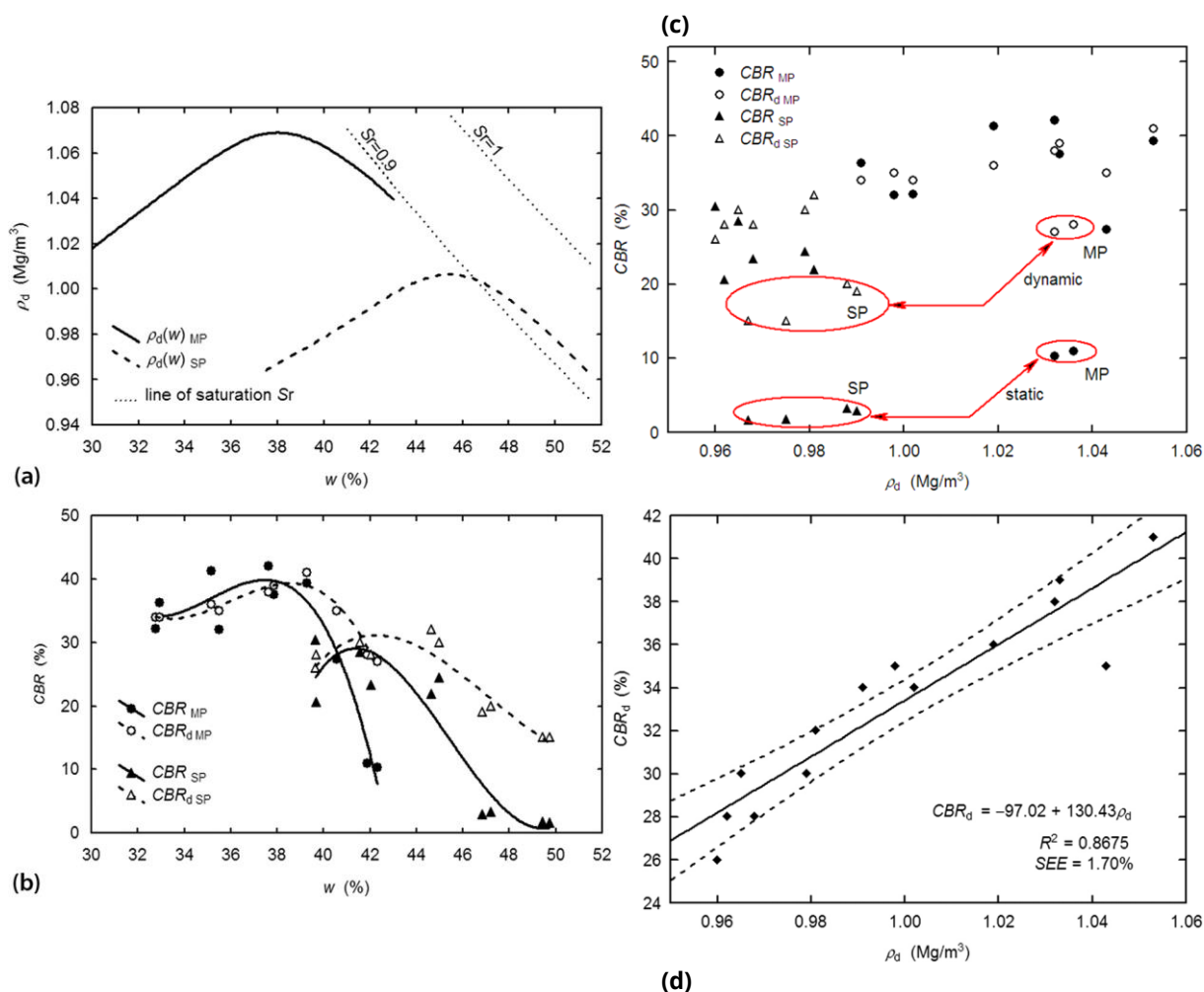
Statická skúška pozostávala z klasického CBR testu.

Prevedenie dynamickej skúšky sa riešilo pomocou ľahkého rázového zaťažovacieho zariadenia (LFWD - *Light Falling Weight Deflectometer*) (obr. 6).



Obr. 6 vľavo – klasická statická skúška CBR ; vpravo – skúška LFWD [6]

## Výstupy z práce:



Obr. 7 (a) – závislosť objemovej hmotnosti na vlhkosti materiálu skúmanej pomocou rôznych Proctorových metód; (b) – závislosť výsledkov skúšok CBR od vlhkosti; (c) – body získané zo skúšok CBR (rôzne metódy) pri danej objemovej hmotnosti; (d) – krivka v závislosti výsledkov  $CBR_d$  pre dané objemové hmotnosti [6]

V rámci vyhodnotenia boli tiež zadefinované rovnice  $CBR_d$  pre dané podmienky zaťažovania a dané zeminy, kde sú zakomponované hodnoty od klasických skúšok CBR, v tomto tvare [6]:

$$CBR_d = A + B * CBR$$

Hodnoty  $A$  dosahovali hodnoty 12 až 17.

Hodnoty  $B$  dosahovali hodnoty 0,5 až 0,66.

## Vyhodnotenie (podľa záveru práce):

- Dynamická skúška  $CBR_d$  môže byť použitá na posudok popolčeka a súdržných zemín v podloží vozoviek, takisto ako aj statická (klasická) CBR skúška. Dôvodom je korelácia vzťahov skúšok  $CBR_d$  a CBR.

- Skúška  $\text{CBR}_d$  môže pri zhutnených pôdach s vlhkosťou väčšou ako je optimálna vlhkosť nadhodnocovať výsledky v dôsledku straty pórového tlaku po zaťažení nárazom.
- Skúška  $\text{CBR}_d$  môže byť používaná vďaka rýchlosti skúšky a jednoduchosti výskumu ako alternatívna metóda ku klasickej metóde kvality pri zhutňovaní alebo ako hodnotenie odolnosti podkladových pôd voči poruche a kapacity zaťaženia
- Dynamický test CBR sa môže vykonávať v laboratóriách s cieľom stanoviť hodnoty  $\text{CBR}_d$  pre zhutnené pôdy podľa špecifikovaných požiadaviek pre konkrétne typy zemných prác. Za daných podmienok v teréne môže byť stanovenie  $\text{CBR}_d$  hodnotené ako posudok zhutňovania zemín a následne porovnávané s hodnotami preddefinovanými v laboratóriu.

## **Praktická část**



## 4 KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI – PRAKTICKÁ ČASŤ

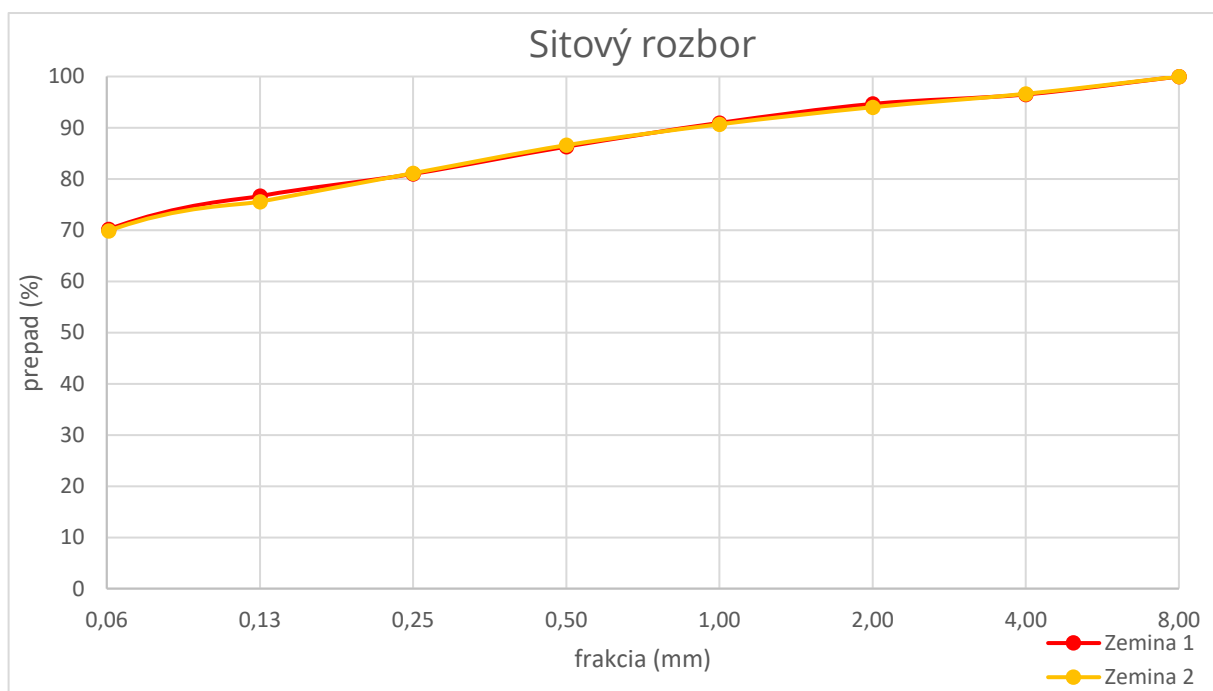
### 4.1 SITOVÝ ROZBOR

Cieľom je rozdeliť sypkú vzorku zeminy zloženú z rôzne veľkých častíc na jednotlivé zrnitostné frakcie. Materiál sa nasype na sito, ktoré sa preleje tečúcou vodou. Častice s menšími rozmermi než je veľkosť oka v site, prepadnú týmto sitom, zatiaľ čo častice s väčšími rozmermi sitom prepadnú. Používame celé sady sít navzájom do seba vložených podľa veľkosti oka. Vzorka zeminy sa nasype do sita s najväčším okom, odkiaľ to ďalej prepadá do sít určených postupne pre menšie frakcie. Pod všetkými sitami je miska na zachytenie najjemnejšej frakcie, menšej než 0,063 mm. Táto skúška je výhodná pre jemnozrnné zeminy hlavne kvôli zabráneniu stratám najjemnejších frakcií pri možnom odprašovaní. Nevýhodou je pracnosť, časová náročnosť ako aj nutnosť následného vysušenia vzorky. Po skončení tejto skúšky sa sústava sít rozoberie a jednotlivé frakcie sa zväžia.

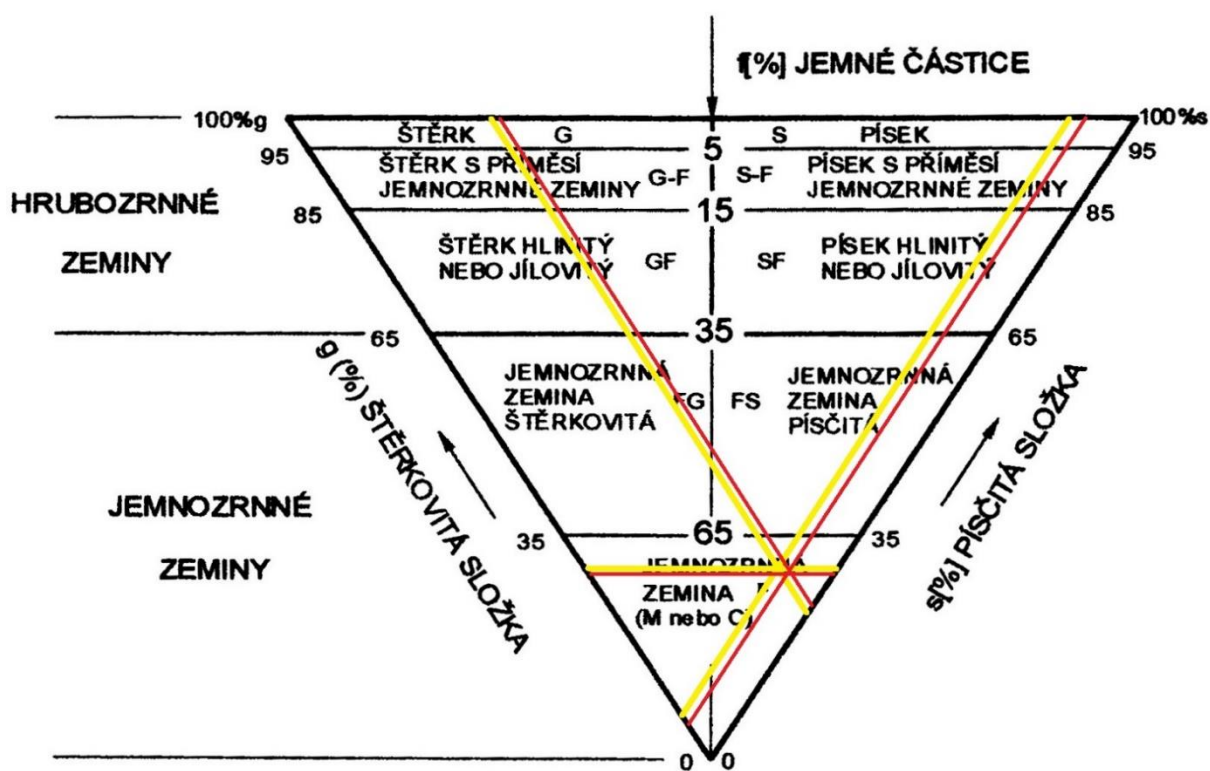
Po zapísaní výsledkov hmotnosti jednotlivých frakcií do tabuľky (tab. 6) sa tieto výsledky znázornia aj graficky (obr. 8). Výsledky nám ukazujú, keďže prepad sitom s najmenšími okami je väčší ako 65 %, že ide o jemnozrnné zeminy.

Tab. 6 Rozdelenie skúšaných zemín na frakcie – Sitový rozbor

|                 | ZEMINA 1<br>$m_{\text{celk}} = 336,6 \text{ g}$ |                            | ZEMINA 2<br>$m_{\text{celk}} = 328,9 \text{ g}$ |                            |
|-----------------|---|----------------------------|---|----------------------------|
| FRAKCIA<br>[mm] | HMOTNOSŤ<br>[g]                                 | PERCENTUÁLNE<br>ZASTÚPENIE | HMOTNOSŤ<br>[g]                                 | PERCENTUÁLNE<br>ZASTÚPENIE |
| >4              | 11,8  | 3,5                        | 11,1  | 3,4                        |
| 2 – 4           | 6,2   | 1,8                        | 8,6   | 2,6                        |
| 1 – 2           | 12,5  | 3,7                        | 11,0  | 3,3                        |
| 0,5 – 1         | 15,6  | 4,6                        | 13,4  | 4,1                        |
| 0,25 – 0,5      | 17,9  | 5,3                        | 18,0  | 5,5                        |
| 0,125 – 0,25    | 14,6  | 4,3                        | 18,3  | 5,6                        |
| 0,063 – 0,125   | 21,8  | 6,5                        | 18,7  | 5,7                        |
| <0,063          | 236,2   | 70,2                       | 229,8   | 69,9                       |



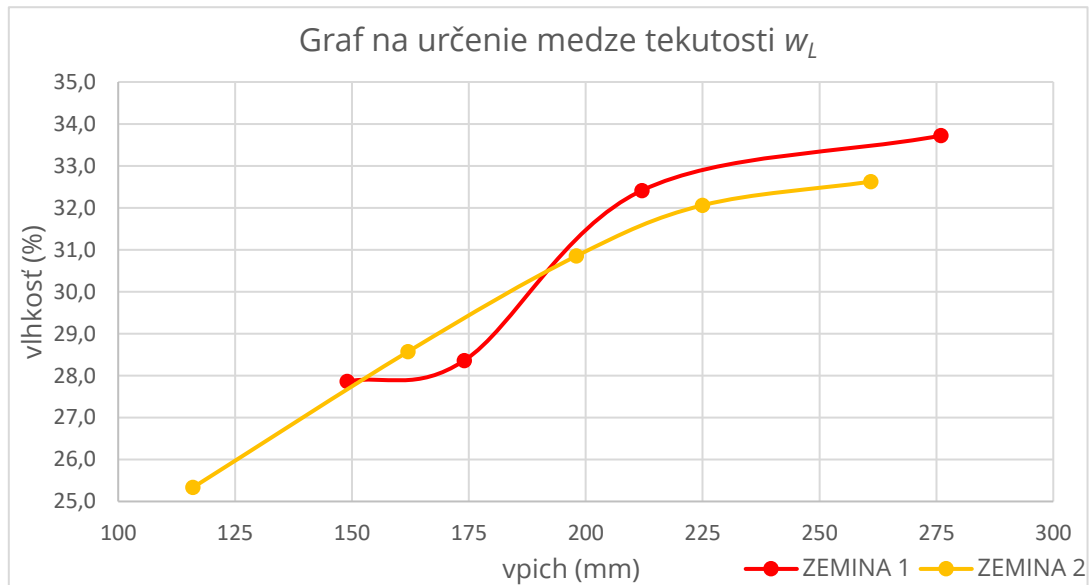
Obr. 8 Graficky znázornený sitový rozbor v logaritmickom merítku



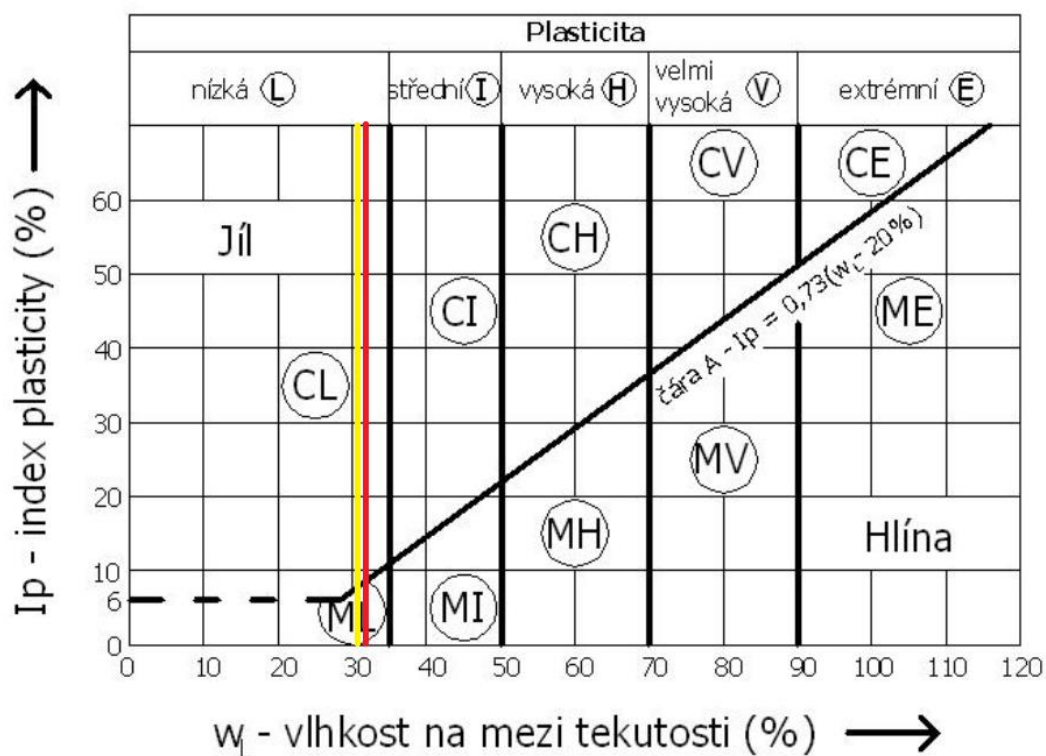
Obr. 9 Trojuhelníkový diagram podľa ČSN 73 6133- Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací

Po zakreslení výsledkov sitového rozboru do trojuholníkového diagramu (obr. 9) na zatriedenie zeminy, vieme určiť že obe skúšané zeminy sú jemnozrnné. Pre bližšie zatriedenie zeminy sa musí ešte určiť index plasticity  $I_p$  pomocou diagramu plasticity  $I_p$ .

## 4.2. INDEX PLASTICITY



Obr. 10 Graf závislosti vlhkosti na hĺbke vpichu ocelového hrotu do vlhkej zeminy;



Obr. 11 Diagram plasticity

Z grafu (obr. 10) sa odčíta vlhkosť na medzi tekutosti  $w_L$  pri vpichu ocelového hrotu do vlhkej zeminy do hrúbky 200 mm,

$$w_{P1} = 31,48\%$$

$$w_{P2} = 30,97\%,$$

ktorá sa následne znázorní v diagrame plasticity (obr. 11).

Keďže nie je stanovená medza plasticity  $w_p$ , nedá sa určiť ani index plasticity  $I_p$ , ktorý má vzťah:

$$I_p = w_L - w_p ,$$

a bez ktorého môžeme stanoviť aspoň to, akú majú zeminy plasticitu.

Z diagramu (obr. 11) vyplýva, že obe zeminy majú nízku plasticitu, ale nedá sa určiť druh zeminy (hlina alebo íl).

Podľa povlaku, ktorý zostáva na rukách pri práci so zeminou optimálnej vlhkosti, sa však dá určiť, že ide o íl.

### 4.3 ZATRIEDENIE ZEMINY (PODĽA ČSN 73 6133)

Obe zeminy sa zatrieďujú ako íly s nízkou plasticitou, F6 CL

### 4.4 MODIFIKOVANÁ PROCTOROVÁ SKÚŠKA

Pre výrobu skúšobných telies sa použije: Modifikovaná Proctorová skúška pre zmesi hutnené pechom o hmotnosti 4,5 kg v širokom Proctorovom mažiari [5]

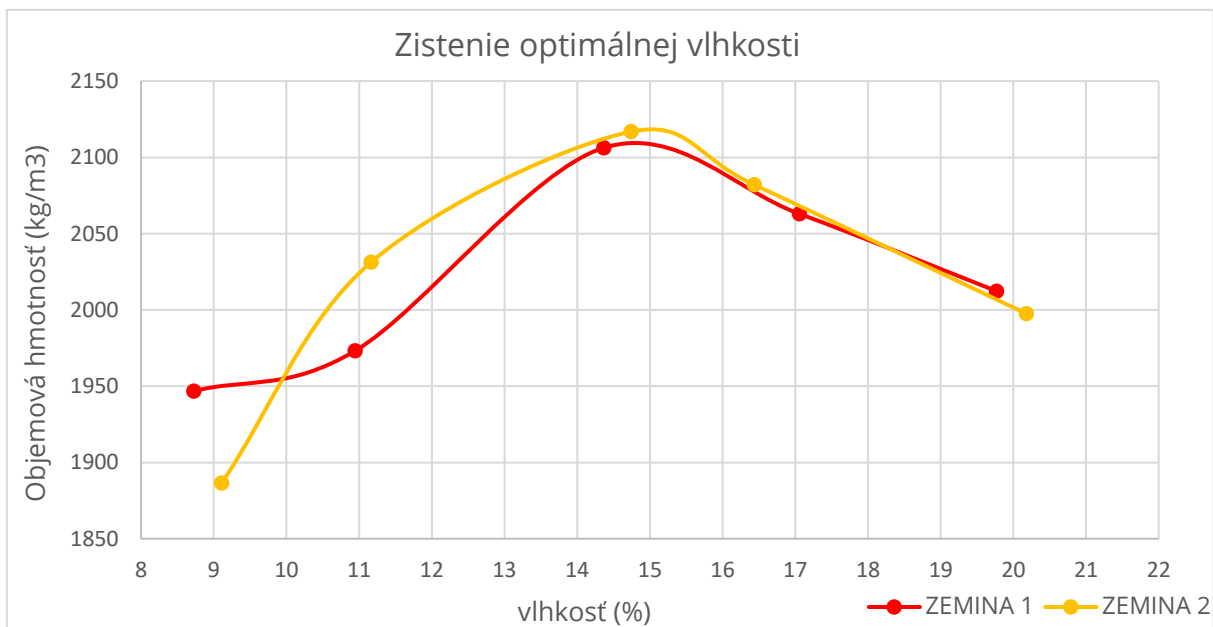
- Pri tejto skúške sa používa na zhutnenie zeminy pech o hmotnosti 4,5 kg dopadajúci z výšky 457 mm na zmes v troch vrstvách v Proctorovom mažiari (A).
- Mažiar sa zväži s presnosťou na 5 gramov a ak nie sú známe vnútorné rozmery, zmeria sa s presnosťou na 0,5 mm. Pripevní sa nástavec a sústava sa umiestni na pevný podklad.
- Z jedného vzorku sa do mažiara vloží také množstvo zeminy optimálnej vlhkosti, aby po zhutnení vyplnilo viac než jednu pätinu objemu mažiara. Hutní sa 56 údermi pechu rovnomerne po celej ploche nasypanej zeminy. Je nutné sa presvedčiť, že pech vždy dopadá voľne a nič mu neprekáža zhutňovať plnou potrebnou energiou.
- Tento postup sa zopakuje ešte štyri krát, pričom posledná vrstva po zhutnení by nemala byť vyššie než 10 mm nad horným okrajom telesa mažiara. Po odňatí nástavca sa prebytočná zmes zarovná s okrajom mažiara. Naplnený mažiar sa zväži s presnosťou

na 5 gramov. Následne sa zemina vyberie a časť sa použije na určenie vlhkosti  $w$  podľa EN 1097-5.

- Výsledky skúšky sa zapíšu do tabuľky (tab. 7).

Tab. 7 Výsledky Modifikovanej Proctorovej skúšky– určenie optimálnej vlhkosti;  $m_{misky} = 3964 \text{ g}$ ,  $V_m = 0,947 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

| ZEMINA 1 |                       |                  |                            |                  |                  |                  |              |
|----------|-----------------------|------------------|----------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|
| VZORKA   | $m_{celk}=[\text{g}]$ | $m_w=[\text{g}]$ | $\sigma=[\text{kgm}^{-3}]$ | $m_m=[\text{g}]$ | $m_w=[\text{g}]$ | $m_s=[\text{g}]$ | $w=[\%]$     |
| 1        | 5807                  | 1843             | <b>1946,78</b>             | 191,0            | 339,3            | 327,4            | <b>8,72</b>  |
| 2        | 5832                  | 1868             | <b>1973,19</b>             | 222,8            | 371,8            | 357,1            | <b>10,95</b> |
| 3        | 5958                  | 1994             | <b>2106,29</b>             | 182,4            | 324,1            | 306,3            | <b>14,37</b> |
| 4        | 5917                  | 1953             | <b>2062,98</b>             | 239,2            | 409,4            | 384,6            | <b>17,06</b> |
| 5        | 5869                  | 1905             | <b>2012,27</b>             | 298,2            | 465,4            | 437,8            | <b>19,77</b> |
| ZEMINA 2 |                       |                  |                            |                  |                  |                  |              |
| VZORKA   | $m_{celk}=[\text{g}]$ | $m_w=[\text{g}]$ | $\sigma=[\text{kgm}^{-3}]$ | $m_m=[\text{g}]$ | $m_w=[\text{g}]$ | $m_s=[\text{g}]$ | $w=[\%]$     |
| 1        | 5750                  | 1786             | <b>1886,57</b>             | 106,2            | 209,2            | 200,6            | <b>9,11</b>  |
| 2        | 5887                  | 1923             | <b>2031,29</b>             | 123,0            | 237,5            | 226,0            | <b>11,17</b> |
| 3        | 5968                  | 2004             | <b>2116,85</b>             | 107,6            | 211,9            | 198,5            | <b>14,74</b> |
| 4        | 5935                  | 1971             | <b>2081,99</b>             | 114,6            | 215,9            | 201,6            | <b>16,44</b> |
| 5        | 5855                  | 1891             | <b>1997,49</b>             | 114,5            | 221,1            | 203,2            | <b>20,18</b> |



Obr. 12 Graf pre zistenie hodnoty vlhkosti, pri ktorej je objemová hmotnosť zeminy najväčšia

Z grafu (obr. 12) vieme určiť hodnoty vlhkosti, pri ktorej má objemová hmotnosť skúšanej zeminy najväčšiu hodnotu, ktorú potrebujeme pre ďalšie skúšanie.

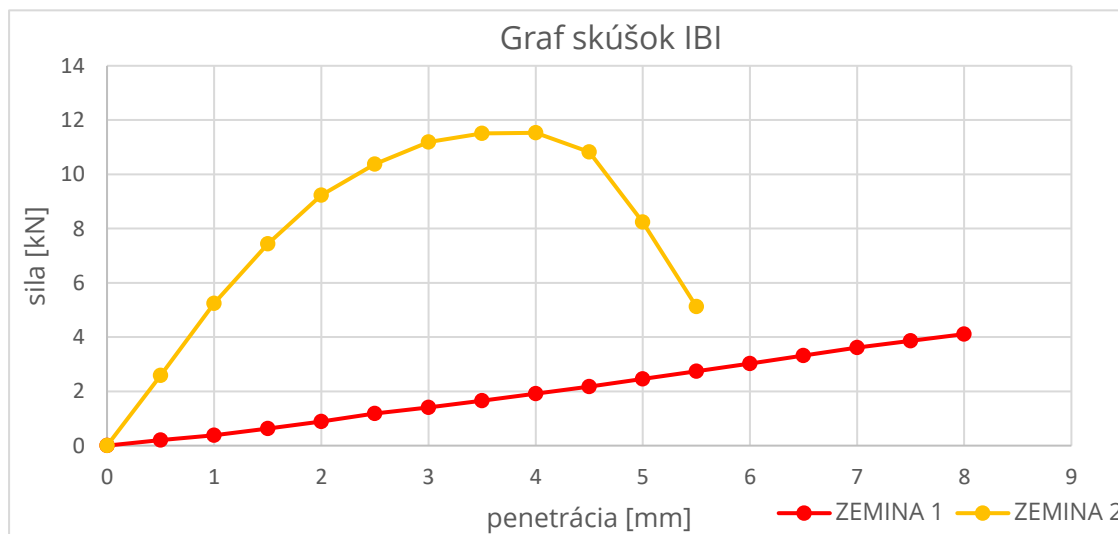
- Pre zeminu 1 -  $w_{OPT} = 14,7\%$
- Pre zeminu 2 -  $w_{OPT} = 15,0\%$

## 4.5 SKÚŠKY CBR/IBI

Prenikanie valcového piestu pri danej rýchlosti do skúšobného telesa stanoví vzťah medzi silou, akou piest pôsobí na teleso a penetráciou vzorky. Vzorka zeminy musí byť vo vopred vypočítanej optimálnej vlhkosti.

Tab. 8 Výsledky skúšok IBI

| ZEMINA 1                |              |                         |              | ZEMINA 2                |              |                         |              |
|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| Zatlačenie<br>trňa [mm] | Sila<br>[kN] | Zatlačenie<br>trňa [mm] | Sila<br>[kN] | Zatlačenie<br>trňa [mm] | Sila<br>[kN] | Zatlačenie<br>trňa [mm] | Sila<br>[kN] |
| 0,0                     | 0,00         | 4,5                     | 2,17         | 0,0                     | 0,00         | 3,0                     | 11,19        |
| 0,5                     | 0,21         | 5,0                     | 2,46         | 0,5                     | 2,59         | 3,5                     | 11,51        |
| 1,0                     | 0,38         | 5,5                     | 2,74         | 1,0                     | 5,24         | 4,0                     | 11,53        |
| 1,5                     | 0,63         | 6,0                     | 3,03         | 1,5                     | 7,44         | 4,5                     | 10,82        |
| 2,0                     | 0,89         | 6,5                     | 3,32         | 2,0                     | 9,23         | 5,0                     | 8,24         |
| 2,5                     | 1,18         | 7,0                     | 3,61         | 2,5                     | 10,38        | 5,5                     | 5,12         |
| 3,0                     | 1,41         | 7,5                     | 3,86         |                         |              |                         |              |
| 3,5                     | 1,66         | 8,0                     | 4,11         |                         |              |                         |              |
| 4,0                     | 1,92         | -                       | -            |                         |              |                         |              |



Obr. 13 Závislosť sily od penetrácie pre zeminu

Podľa grafu z normy ČSN EN 13286 – 47 by sa krivka zeminy č. 1 (obr. 13) mohla hodnotiť podľa krivky č. 2 (obr. 3). Toto sa môže zanedbať z dôvodu malého prípadného rozdielu opravnej krivky a skutočnosti, že krivka má takmer lineárny tvar.

Po skúške CBR sa dá prehlásiť, že ak majú dve jemnozrnné zeminy všetky predchádzajúce výsledky skúšok a zatriedenia rovnaké, neznamená to, že skúšané zeminy majú aj takú istú

odolnosť voči zaťaženiu. Keďže ide o jemnozrnné zeminy, s najväčšou pravdepodobnosťou je to spôsobené rôznym zložením pod frakciou 0,063 mm.

### Vyhodnotenie skúšky:

#### Výpočet CBR/IBI pre zeminu 1:

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 2,5 mm je 1,18 kN.

$$IBI_{2,5mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{1,18}{13,2} * 100 = 8,94\% \approx 9\%$$

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 5,0 mm je 2,46 kN.

$$IBI_{5,0mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{2,46}{20,0} * 100 = 12,3\% \approx 12\%$$

Hodnota IBI pre zeminu 1: **12%**

#### Výpočet CBR/IBI pre zeminu 2:

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 2,5 mm je 10,38 kN.

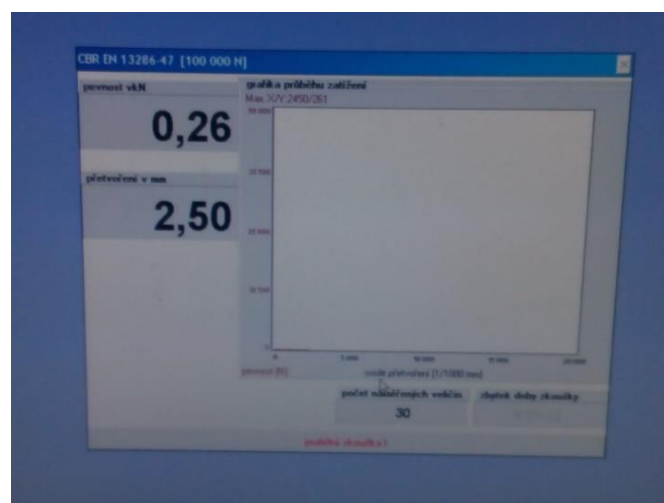
$$IBI_{2,5mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{10,38}{13,2} * 100 = 78,6\% \approx 80\%$$

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 5,0 mm je 8,24 kN.

$$IBI_{5,0mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{8,24}{20,0} * 100 = 41,2\% \approx 40\%$$

Hodnota IBI pre zeminu 2: **80%**

**Saturovaná skúška CBR:** Výsledky tejto skúšky boli nepreukazné. Zaťaženie na vzorky zemín, ktorá bola saturovaná vo vode približne 96 hodín, nedokázalo vydať, na vzorky zarezané podľa formy, relevantné výsledky (obr. 14), takže za preukazné považujem v tomto meraní hodnoty skúšky IBI.



Obr. 14 Veľkosť sily [kN] pri penetrácii 2,5 mm zo saturovanej vzorky

## 5 KALIFORNSKÝ POMER ÚNOSNOSTI – DYNAMICKÁ SKÚŠKA

V tejto kapitole sa venujem porovnaniu rôznych modifikácií skúšok zemín pôsobením dynamického zaťaženia. Základom týchto skúšok sú zaťažovacie skúšky CBR/IBI (kap. 3.2.).

Parametre zeminy z predchádzajúcich meraní:

- ZEMINA 1: - jemnozrnná zemina F6 CL
  - $w_{OPT} = 14,7\%$
  - $IBI_s = 80\%$
- ZEMINA 2: - jemnozrnná zemina F6 CL
  - $w_{OPT} = 15\%$
  - $IBI_s = 12\%$

### 5.1 PRÍPRAVA VZORKY

Pre prípravu vzorky zeminy si zvolíme tvar mažiaru. Tvar musí byť valcový, ale forma, aká sa použila v skúške statickej, nebude vhodná. Použije sa forma väčšej šírky a výšky, kvôli lepšiemu roznosu dynamického zaťaženia, ktoré sa roznáša pod daným uhlom.

A z praktického hľadiska ide aj o možnosť väčšieho počtu skúšok.

Keďže sa zmení objem skúšanej vzorky, treba pre ňu nastaviť aj príslušné podmienky použitia. Musí sa dať pozor hlavne na množstvo dodanej energie pri zhutňovaní do formy.

Keďže vzorec pre energiu dodanú zemine pri zhutnení je:

$$E = \frac{m * g * h * n * u}{V}$$

musí sa počet úderov (počet cyklov  $n$  a počet opakovaní v cykle  $u$ ) v čitateli priamo úmerne zmeniť zvýšenému objemu v menovateli.

Parametre statickej zať. skúšky: výška dopadu:  $v = 0,457$  m

hmotnosť pechu:  $m = 4,5$  kg

počet úderov:  $n * u = 5 * 56$

objem formy:  $V = 2,1206 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  ( $r = 0,15$  m;  $h = 0,12$  m)

$$E = \frac{4,5 * 9,81 * 0,457 * 5 * 56}{2,1206 * 10^{-3}} = 2663,77 \text{ kJ}$$

Parametre dynamickej zať. skúšky: výška dopadu:  $v = 0,457$  m

hmotnosť pechu:  $m = 4,5$  kg

objem formy:  $V = 9,8175 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  ( $r = 0,25$  m;  $h = 0,2$  m)



$$E = \frac{m * g * h * n * u}{V} \rightarrow n * u = \frac{V * E}{m * g * h}$$

$$n * u = \frac{9,8175 * 10^{-3} * 2663,77 * 10^3}{4,5 * 9,81 * 0,457} = 1296,3 \cong 1296 \text{ úderov}$$

Výška mažiara sa mení z  $h = 0,12 \text{ m}$  na  $h = 0,2 \text{ m}$ . Pri použití 5 hutniacich vrstiev, by tieto vrstvy mali veľkú hrúbku ( $0,04 \text{ m}$ ), čo by znamenalo nedostatočné zhutnenie vrstiev a hlavne veľkú pracnosť počas jedného cyklu (až 260 úderov). Preto sa nechá hrúbka jednotlivých hutniacich vrstiev približne rovnaká a zvýši sa počet cyklov potrebných na zhutnenie vzorky a tým sa zníži aj počet opakovaní v cykle.

Pri  $h = 0,12 \text{ m}$  :  $h/n = 0,12/5 = 0,024 \text{ m}$

Návrh: počet hutniacich vrstiev,  $n = 8$

Pri  $h = 0,2 \text{ m}$  ;  $h/n = 0,2/8 = 0,025 \text{ m}$

Kontrola:  $1296 \text{ úderov} / 8 \text{ vrstiev} = 162 \text{ úderov na vrstvu}$

Zvolený počet hutniacich vrstiev a počet úderov na jednu vrstvu som zvolil  **$n * u = 8 * 162$** .

## 5.2 PRÍPRAVA ZAŤAŽOVACEJ SCHÉMY

Na začiatku skúšky si stanovím zaťaženie, ktoré bude pôsobiť na vzorku zeminy. Je potrebné určiť vhodný prístroj, ktorým sa bude zaťažovať vzorka, tak ako aj odčítanie deformácií.

Vzorka sa bude zaťažovať lisom umožňujúcim dynamické impulzné zaťaženie, ktorý pomocou spodnej plochy zaťažovacieho trňa, preniesie zaťaženie do vzorky zhutnenej zeminy. Je dôležité, aby plocha trňa pôsobiaca na vzorku bola zhodná so zaťažovacou plochou použitou pri klasickej CBR/IBI skúške ( $\varnothing = 5 \text{ cm}$ ).

Ďalším problémom, ktorý treba vyriešiť, je odčítanie dynamicky sa meniace deformácie, ak to daný prístroj nedokáže. Existuje mnoho možností odčítania deformácie, napr. odchýlkomerom, ktorý sa uchyťí rôznymi spôsobmi pomocou bežných laboratórnych pomôcok (obr. 15 a16).



*Obr. 15 a 16 Systém zaťaženia zeminy a rôzne možnosti odčítania deformácie*

Ďalší krok je nastaviť dobu priťažovania a odľahčovania. Táto doba sa nastaví tak, aby nebola príliš krátka, keďže je potrebné odčítať výsledky z neustále pohybujúcej sa ručičky odchýlkometra. Zároveň by táto doba nemala byť ani príliš dlhá, lebo náprava pohybujúceho sa vozidla, ktorá pôsobí na vozovku (podložie), sa aj pri pomalejšej rýchlosti vozidla nezdrží dlhý čas na jednom mieste. Pre tieto dôvody sa nastaví doba priťažovania 1,5 sekundy. Doba odľahčenia je totožná s dobou priťažovania.

Údaj potrebný na vykonanie dynamickej skúšky je taktiež počet priťažovaných cyklov. Použitý prístroj umožňuje použiť najviac 8 zaťažovacích cyklov. Počet opakovaní v každom cykle sa nastaví zo začiatku na 10.

Keďže program pracuje s hodnotami napätia a pri klasickej skúške CBR sa sledovala sila, je nutné previesť hodnoty zaťaženia z kN na kPa pomocou vzorca:

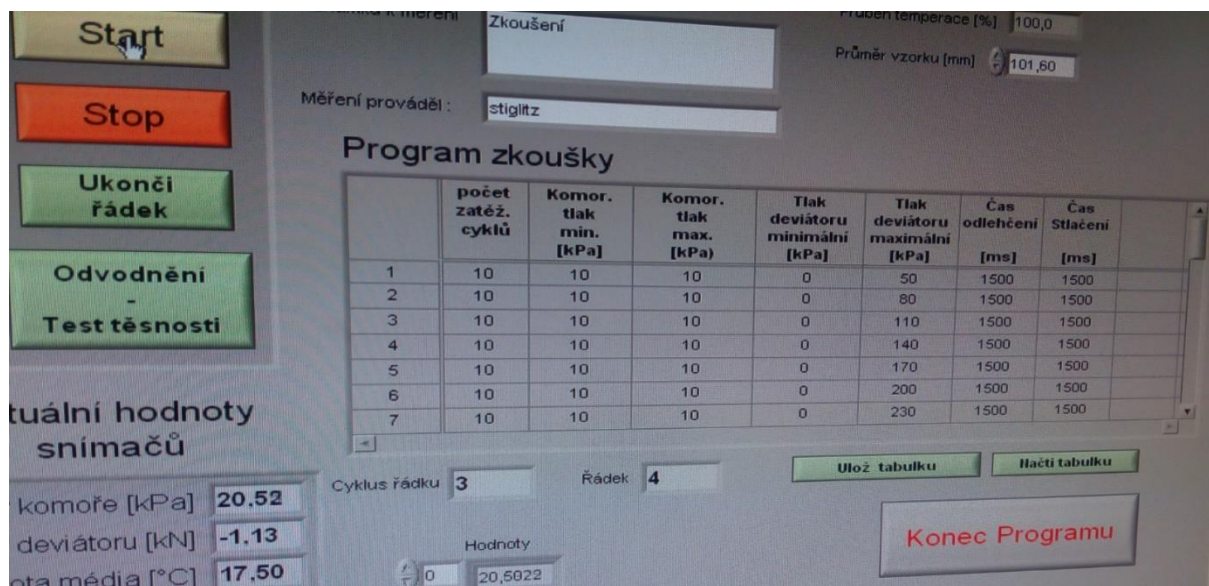
$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Plocha  $A$  je spodná plocha zaťažovacieho trňa ( $\varnothing = 5 \text{ cm}$ ). Sila  $F$  sa zvolí tak, aby počiatočné napätie nespôsobilo veľmi priveľkú alebo veľmi primalú deformáciu. Navrhovaná sila pôsobiaca v prvom cykle sa stanoví na 1 kN za cyklus, v ktorom je 10 opakovaní. Z toho vyplýva:

$$\sigma = \frac{F}{A * n} = \frac{1 \text{ kN}}{\pi * 0,025 \text{ m}^2 * 10} = 50,93 \text{ kPa}$$

Pre lepšie zadávanie do programu sa hodnota napätia stanoví na okrúhle číslo: **50 kPa**, čo teoreticky znamená, že v prvom cykle sa prerozdelené zaťaženie približne 1 kN (príklad pre hodnoty na skúšky Zeminy 2). Hodnoty zaťaženia v ďalších cykloch sa budú zväčšovať lineárne.

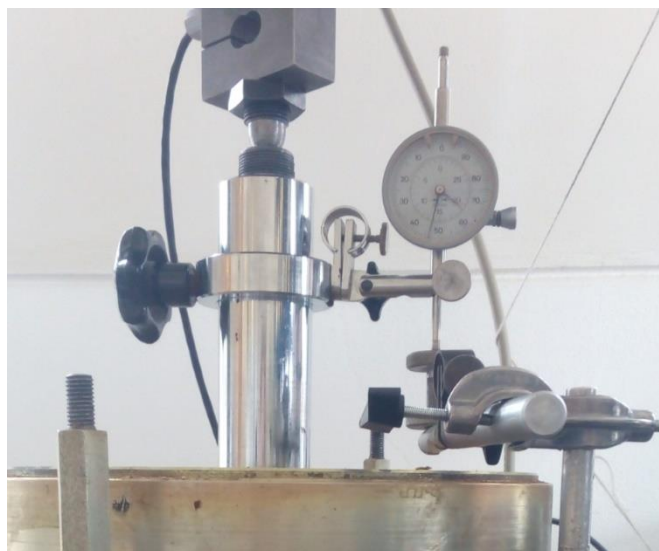
Po kompletnej vyplnení tabuľky (obr. 17) a dosadením spodnej plochy trňa na vrchnú hranu zeminy vo forme, sa môže začať samotné meranie.



Obr. 17 Zadávací tabulka dynamickej skúšky

## 5.3 PRIEBEH A ZÁPIS SKÚŠKY

Meranie začína kliknutím na „Start“. Program sa spustí a začne pôsobiť dynamickým zaťažením na zeminu. Ručička odchýlkometra neustále ukazuje meniacu sa deformáciu. Keďže doba pritaženia je 1,5 sekundy, nedá sa ručne zapisovať hodnoty počas merania, kvôli neustálemu pohybu ručičky (obr. 18). Preto sa zapíše iba deformácia po každom zaťažovacom cykle.



*Obr. 18 Detail na odchýlkomer*

Keďže pracnosť vytvorenia takejto vzorky zeminy je veľká, takisto ako aj množstvo použitého materiálu, využijeme túto vzorku na viac meraní. Vďaka väčšej forme (aj na šírku aj na výšku) máme možnosť vykonania viacerých skúšok bez toho, aby prišlo k prílišnej deformácii vzorky (obr. 19). Merania sa budú vykonávať v poradí od najmenšieho zaťažovania, aby nedošlo predbežne ku prílišnému napätiu zeminy, ktoré by malo za následok skreslenie reálnych výsledkov od dynamického zaťaženia, čiže priskorú deformáciu vrstiev zhutnenej zeminy,



*Obr. 19 Využitie veľkej plochy vzorky pre účel viacerých meraní*

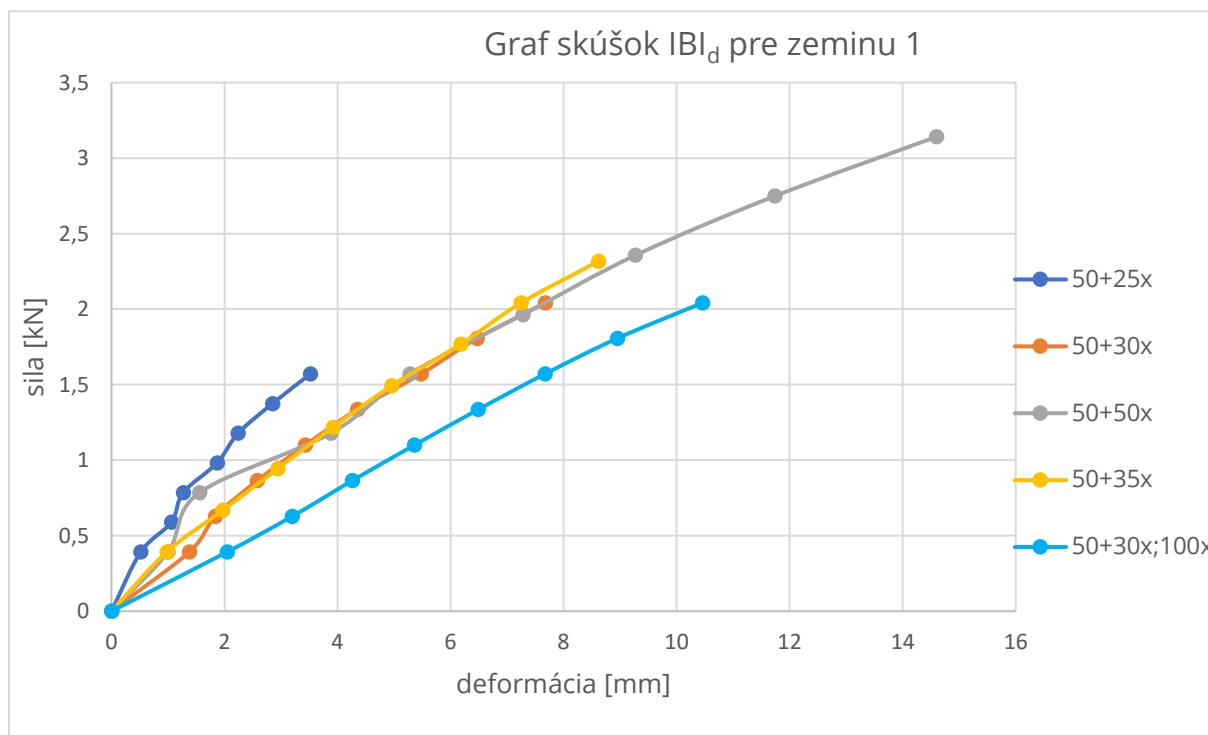
Možností modifikácie tejto skúšky je mnoho. Môže sa zmeniť pôsobiace dynamické zaťaženie, doba priťažovania, prípadne aj počet cyklov alebo opakovaní v cykle.

V tejto práci som použil rôzne zaťaženia na zeminu, ako aj rôzny počet opakovaní v cykle. Dobu priťažovania som nemeril, z vyššie uvedených dôvodov.

Pre jednu zeminu nám vznikne po vyplnení údajov tabuľka (tab. 9 a 10) a následné vykreslenie údajov merania (obr. 20 a 21).

Tab. 9 Tabuľka nameraných hodnôt pre vykreslenie  $IBI_d$  – Zemina 1

|                     |           |      |      |      |       |       |
|---------------------|-----------|------|------|------|-------|-------|
| začiatok [kPa]:     |           | 50   | 50   | 50   | 50    | 50    |
| priťaženie [kPa]:   |           | 25   | 30   | 35   | 50    | 30    |
| opakovania v cykle: |           | 10   | 10   | 10   | 10    | 100   |
| séria:              | začiatok: | 0    | 0    | 0    | 0     | 0     |
| 1.                  | [mm]      | 0,52 | 1,38 | 0,98 | 1,00  | 2,05  |
| 2.                  |           | 1,06 | 1,84 | 1,97 | 1,56  | 3,2   |
| 3.                  |           | 1,27 | 2,58 | 2,94 | 3,88  | 4,26  |
| 4.                  |           | 1,87 | 3,43 | 3,92 | 5,28  | 5,36  |
| 5.                  |           | 2,24 | 4,35 | 4,96 | 7,28  | 6,49  |
| 6.                  |           | 2,85 | 5,48 | 6,18 | 9,27  | 7,67  |
| 7.                  |           | 3,52 | 6,47 | 7,25 | 11,74 | 8,95  |
| 8.                  |           | -    | 7,68 | 8,62 | 14,60 | 10,46 |



Obr. 20 Graf závislosti deformácii na sile pre Zeminu 1

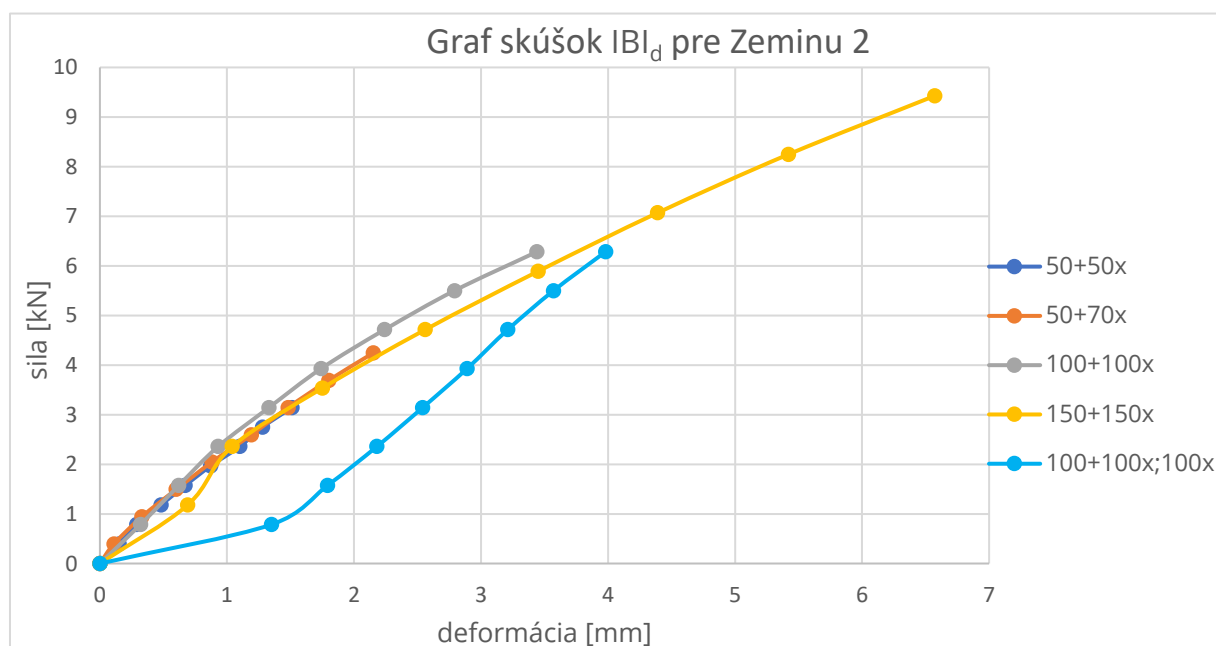
**Legenda** pre grafy v obr. 20 a 21:

50+25x – počiatočné priťaženie 50 kPa, priťaženie za sériu 25 kPa, počet opakovaní v cykle 10x

50+30x;100x – počiatočné priťaženie 50 kPa, priťaženie za sériu 30 kPa, počet opakovaní 100x

Tab. 10 Tabuľka nameraných hodnôt pre vykreslenie  $IBI_d$  – Zemina 2

|                     |           |      |      |      |      |      |
|---------------------|-----------|------|------|------|------|------|
| začiatok [kPa]:     |           | 50   | 50   | 100  | 150  | 100  |
| priťaženie [kPa]:   |           | 50   | 70   | 100  | 150  | 100  |
| opakovania v cykle: |           | 10   | 10   | 10   | 10   | 100  |
| séria:              | začiatok: | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| 1.                  | [mm]      | 0,15 | 0,11 | 0,32 | 0,69 | 1,35 |
| 2.                  |           | 0,29 | 0,33 | 0,62 | 1,04 | 1,79 |
| 3.                  |           | 0,48 | 0,60 | 0,93 | 1,75 | 2,18 |
| 4.                  |           | 0,67 | 0,88 | 1,33 | 2,56 | 2,54 |
| 5.                  |           | 0,87 | 1,19 | 1,74 | 3,45 | 2,89 |
| 6.                  |           | 1,10 | 1,48 | 2,24 | 4,39 | 3,21 |
| 7.                  |           | 1,28 | 1,80 | 2,79 | 5,42 | 3,57 |
| 8.                  |           | 1,51 | 2,15 | 3,44 | 6,57 | 3,98 |



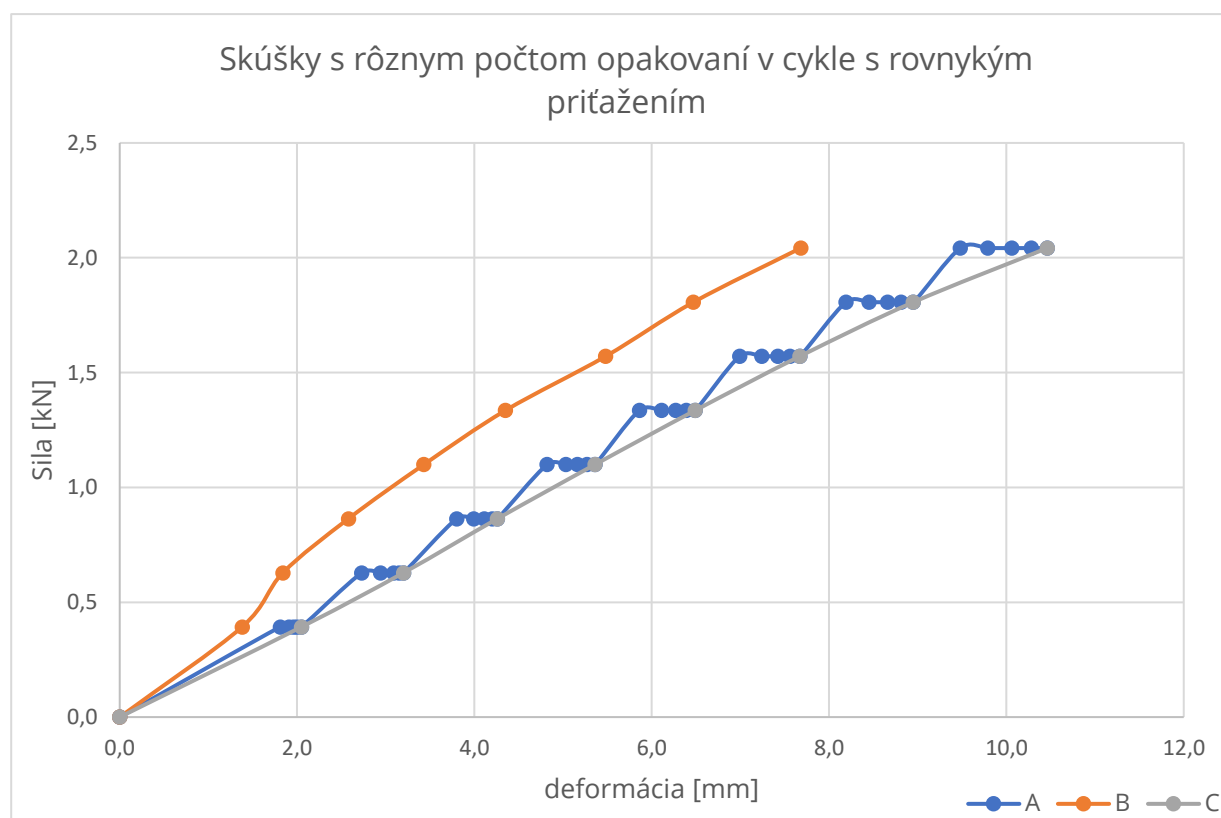
Obr. 21 Graf závislosti deformácií na sile pre Zeminu 2

Bledomodrá krivka (v obr. 20 a 21) označuje priebeh skúšky, kde jeden cyklus pozostáva zo 100 opakovaní až následne sa zvyšuje zaťaženie. Pri tomto meraní sa zapisovala hodnota po každých 20 opakovaníach. Tieto hodnoty sú zapísané v tabuľke (tab. 11). Údaje sa následne znázornia aj graficky (obr. 22) a vyhodnotia sa.



Tab. 11 Tabuľka deformácií pri počte 100 opakovaní v cykle

| ZEMINA 1           |           |        |      |       |       |              | ZEMINA 2           |           |         |      |      |      |             |
|--------------------|-----------|--------|------|-------|-------|--------------|--------------------|-----------|---------|------|------|------|-------------|
| začiatok [kPa]:    |           | 50 kPa |      |       |       |              | začiatok [kPa]:    |           | 100 kPa |      |      |      |             |
| príťaženie [kPa]:  |           | 30 kPa |      |       |       |              | príťaženie [kPa]:  |           | 100 kPa |      |      |      |             |
| opakovania v cykle |           | 20x    | 40x  | 60x   | 80x   | <b>100x</b>  | opakovania v cykle |           | 20x     | 40x  | 60x  | 80   | <b>100x</b> |
| séria              | začiatok: | 0      |      |       |       |              | séria              | začiatok: | 0       |      |      |      |             |
| 1.                 | [mm]      | 1,81   | 1,91 | 1,96  | 2,00  | <b>2,05</b>  | 1.                 | [mm]      | 1,34    | 1,35 | 1,35 | 1,35 | <b>1,35</b> |
| 2.                 |           | 2,73   | 2,94 | 3,09  | 3,15  | <b>3,20</b>  | 2.                 |           | 1,72    | 1,76 | 1,78 | 1,78 | <b>1,79</b> |
| 3.                 |           | 3,80   | 3,99 | 4,11  | 4,20  | <b>4,26</b>  | 3.                 |           | 2,09    | 2,13 | 2,16 | 2,16 | <b>2,18</b> |
| 4.                 |           | 4,82   | 5,03 | 5,16  | 5,27  | <b>5,36</b>  | 4.                 |           | 2,43    | 2,48 | 2,51 | 2,52 | <b>2,54</b> |
| 5.                 |           | 5,86   | 6,11 | 6,27  | 6,39  | <b>6,49</b>  | 5.                 |           | 2,75    | 2,82 | 2,51 | 2,52 | <b>2,54</b> |
| 6.                 |           | 6,99   | 7,24 | 7,42  | 7,56  | <b>7,67</b>  | 6.                 |           | 3,09    | 3,15 | 3,18 | 3,19 | <b>3,21</b> |
| 7.                 |           | 8,19   | 8,45 | 8,66  | 8,81  | <b>8,95</b>  | 7.                 |           | 3,4     | 3,41 | 3,53 | 3,53 | <b>3,57</b> |
| 8.                 |           | 9,48   | 9,79 | 10,06 | 10,28 | <b>10,46</b> | 8.                 |           | 3,74    | 3,85 | 3,9  | 3,94 | <b>3,98</b> |



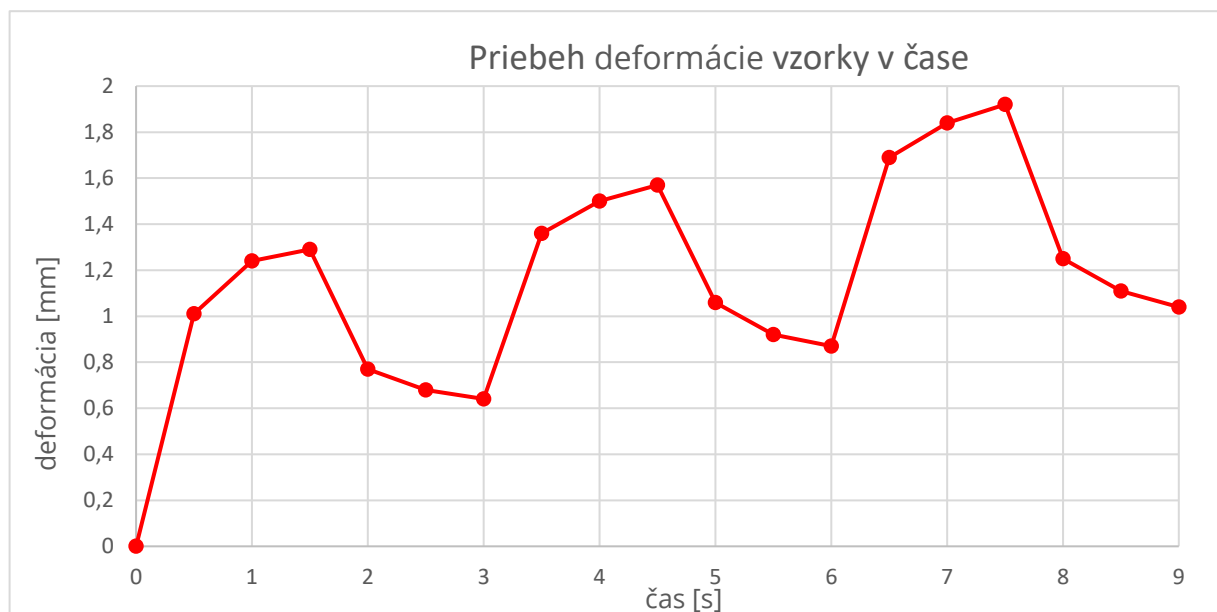
Vysvetlivky: A – Skúška so 100 opakovaniami v cykle; body odčítané po 20 opakovaníach  
 B – Skúška s 10 opakovaniami v cykle  
 C – Skúška so 100 opakovaniami v cykle; body odčítané po 100 opakovaníach

Obr. 22 Graf porovnania výsledkov s ohľadom na rôzny počet opakovaní v cykle

Na obrázku (obr. 22) môžeme vidieť priebeh dynamických skúšok s rôznym počtom opakovania v cykle. Skúška s desiatimi opakovaniami má takmer lineárny priebeh, takisto ako skúška so 100 opakovaniami, kde sa berú hodnoty len na konci cyklu. Po vykreslení môžeme urobiť logický záver, že skúška s väčším počtom opakovaní má pri rovnakej hodnote priťaženia väčšiu deformáciu. Zároveň môžeme konštatovať, že existuje vzťah medzi týmito dvoma krivkami, ktoré majú priebeh podobný lineárnemu (priebeh krivky v skúmanom mieste by sa mohol preložiť priamkou v tvare  $y = k \cdot x + q$ ), kde sa krivky líšia takmer len odlišnou hodnotou tangenty uhlu.

Z grafu taktiež vyplýva, že modrá krivka (zakreslené sú hodnoty po 20 opakovaniach, zvýšenie priťaženia po 100 opakovaniach) reálnejšie zaznamenáva deformáciu vzorky zeminy, kde má krivka priebeh v tvare schodiska. Najväčšie deformácie sú zaznamenané po prvých 20 opakovaniach v cykle. Hodnota deformácie po následných 20 opakovaniach sa znižuje a takto to ide až do konca cyklu, čo je zrejmé aj z tab. 11.

#### **Priebeh deformácie v čase:**



*Obr. 23 Graf možného priebehu deformácie v čase pri metóde dynamického zaťaženia; doba priťaženia aj doba odľahčenia je 1,5 sekundy*

Odchýlkometrom môžeme sledovať počas dynamickej metódy aj závislosť deformácie na čase. V prvých momentoch konštantného priťaženia sa mení deformácia najviac, takisto ako aj pri odľahčení vzorky.



## 5.4 VYHODNOTENIE SKÚŠOK

Na základe výsledných grafov (obr. 20 a 21) môžeme povedať, že skúška má relevantné výsledky. Krivky skúšaných vzoriek sú priebehom veľmi podobné, čo znamená, že zemina nestratila na odolnosti voči deformácii ani početnosťou skúšok na jednom skúmanom telese.

Odčítame potrebné sily pri deformáciách 2,5 a 5 mm tak, ako pri klasickej skúške. Výsledky porovnáme s normovými hodnotami  $CBR_{2,5mm}$  a  $CBR_{5mm}$ .

### Vyhodnotenie skúšky:

#### Výpočet CBR/IBI pre zeminu 1:

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 2,5 mm je 0,82 kN.

$$IBI_{2,5mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{0,82}{13,2} * 100 = 6,2\% \approx 6\%$$

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 5,0 mm je 1,48 kN.

$$IBI_{5,0mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{1,48}{20,0} * 100 = 7,4\% \approx 7,5\%$$

Hodnota IBI pre zeminu 1: **7,5%**

#### Výpočet CBR/IBI pre zeminu 2:

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 2,5 mm je 4,60 kN.

$$IBI_{2,5mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{4,60}{13,2} * 100 = 34,8\% \approx 35\%$$

- Sila zodpovedajúca penetrácii trňa do hĺbky 5,0 mm je 7,77 kN.

$$IBI_{5,0mm} = \frac{F}{F_s} * 100 = \frac{7,77}{20,0} * 100 = 38,9\% \approx 40\%$$

Hodnota IBI pre zeminu 2: **40%**

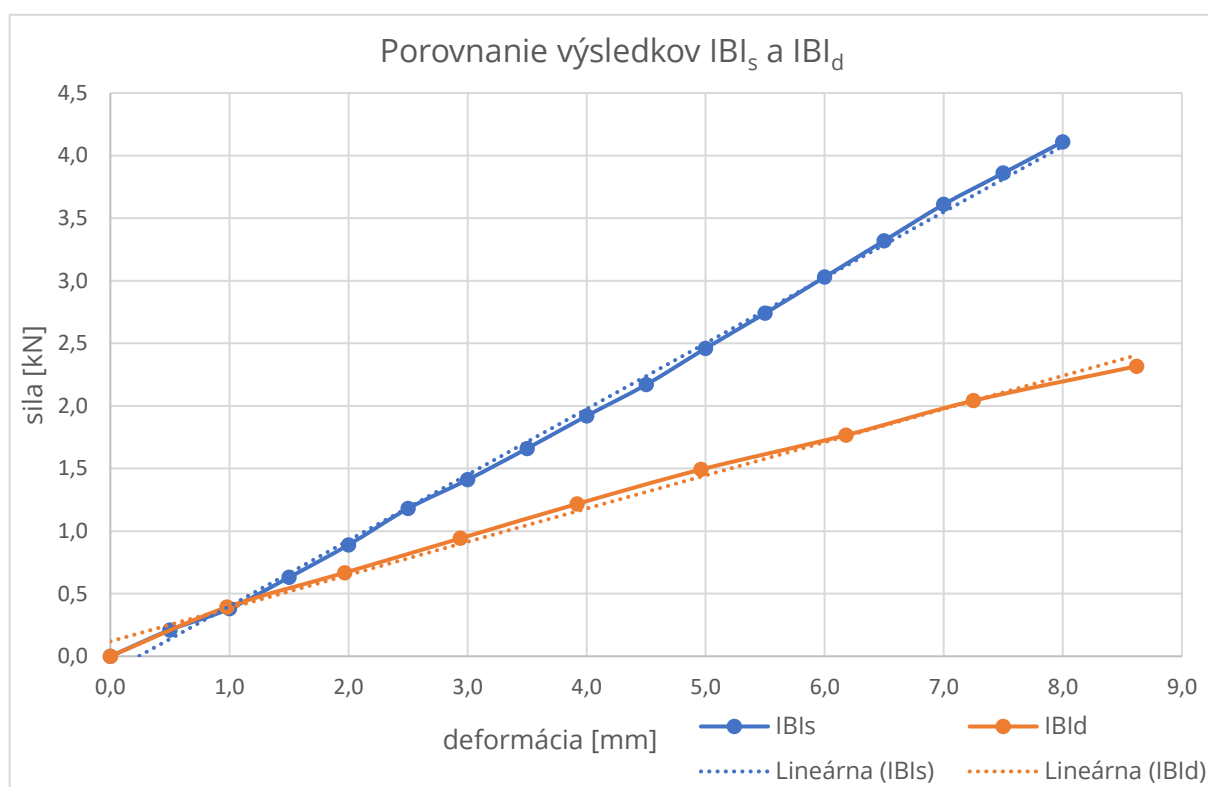
**Saturovaná skúška  $CBR_d$ :** Po statickej skúške na saturovanom vzorku môžeme predpokladať, že skúška  $CBR_d$  na saturovanom vzorku by bola taktiež nepreukazná. Ak pracujeme aj so skutočnosťou, že výsledky novej skúšky by sme nemali ako porovnať so statickou metódou, skúšku  $CBR_d$  na saturovanom vzorku nemá zmysel vykonávať.

## 6 POROVNANIE VÝSLEDKOV IBI

V tejto kapitole sa budem venovať porovnávaniu výsledkov vykonanej statickej skúšky ( $IBI_s$ ) s dosiahnutými výsledkami zo skúšky s dynamickým zaťažením ( $IBI_d$ ).

### 6.1 ZEMINA 1 – F6 CL

Keďže pri dynamickej metóde mali všetky skúšky veľmi podobný priebeh, vybral som pre posúdenie krivky, ktorá dosiahla takú hodnotu deformácie, akú dosiahla skúška statická.



Obr. 24 Graf porovnanie kriviek výsledkov statickej a dynamickej skúšky CBR - Zemina 1

Z grafu (obr. 24) porovnania výsledkov skúšok vyplýva, že pri dynamickej skúške je deformácia pri určitom zaťažení o niečo viac než polovičná oproti skúške statickej. Spôsobené to je primárne odľahčovaním počas skúšky. Skutočnosť, že po zaťažovaní dostáva vzorka zeminy toľko isto času na odľahčenie, má za následok pokles hodnoty deformácie. Prístroj musí časť hrúbky vzorky, ktorá sa deformovala v predchádzajúcom priťažení, prekonať znovu. Z toho vyplýva, že pri danom zaťažení bude mať dynamická metóda menšiu dosiahnutú konečnú deformáciu.

Ak je priebeh závislosti sily na deformáciu približne lineárneho charakteru, môžeme za pomoci metódy najmenších štvorcov preložiť krivky priamkami. Každá z týchto priamok môže byť definovaná rovnicou v tvare:  $y = k * x + q$ .

Lineárna  $IBI_s$ :  $y = 0,525 * x - 0,126$

Lineárna  $IBI_d$ :  $y = 0,264 * x + 0,12$

Tieto dve priamky sa stretli v bode [0,95 ; 0,37].

Z týchto informácií môžeme určiť ich vzájomný vzťah pomocou rovnice v tvare:

$$IBI_d = A + B * IBI$$

kde,

$A$  je hodnota, kde sa priamky krížia,

$B$  je hodnota podielu použitej sily pri danej deformácii (musí byť v rozmedzí 0 až 1 kvôli vzájomnej pozícii priamok).

**Výsledná rovnica:**  $IBI_d = 0,37 + 0,502 * IBI$

**Porovnanie výpočtov  $IBI$ :**

Hodnota  $IBI_s$ : 12%

Hodnota  $IBI_d$ : 7,5%

Číselný údaj, ktorý sa použije pri vyhodnotení číselných výsledkov, bude podiel hodnoty  $IBI_s$  a hodnoty  $IBI_d$ .

$$\frac{IBI_d}{IBI_s} = \frac{7,5\%}{12\%} = 0,625 = 62,5\%$$

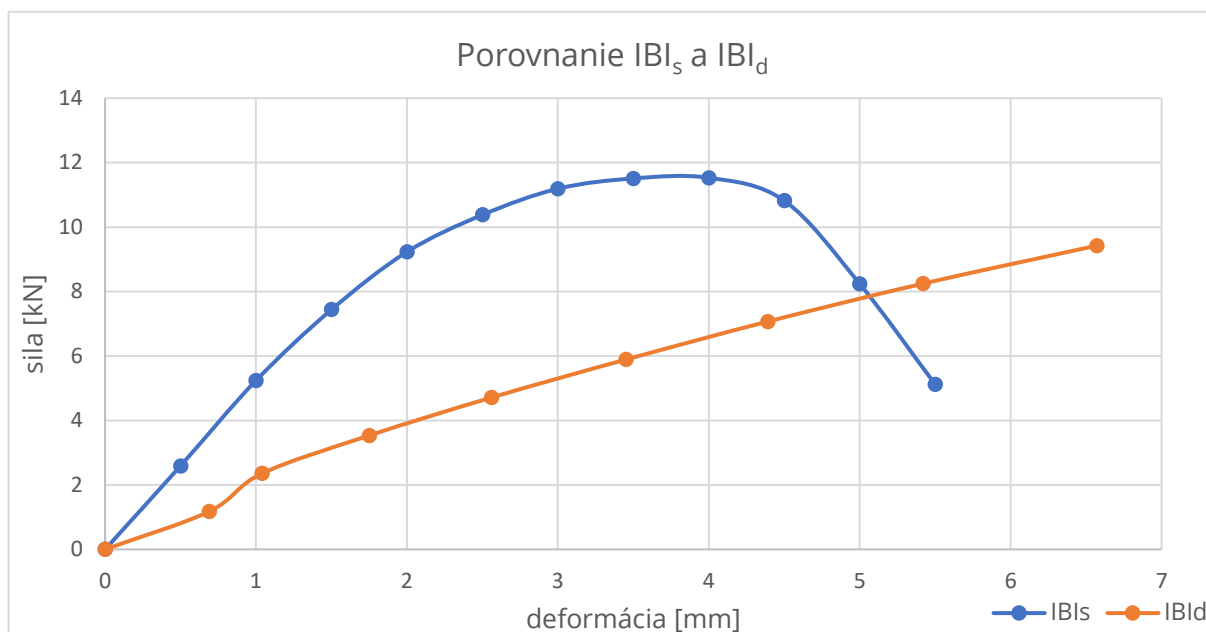
Keď porovnáme výsledné hodnoty získané z grafu (50,2%) a hodnoty získané z normového vzťahu (62,5%), zistíme, že sa príliš nelíšia. Meranie môžeme určiť za úspešné.

Za preukaznú metódu v tejto práci sa môže určiť metóda grafická, pretože zahŕňa väčšie množstvo faktorov a dát. Ako výsledok tohto merania sa tým pádom berie rovnica:

**$IBI_d = 0,37 + 0,502 * IBI$**

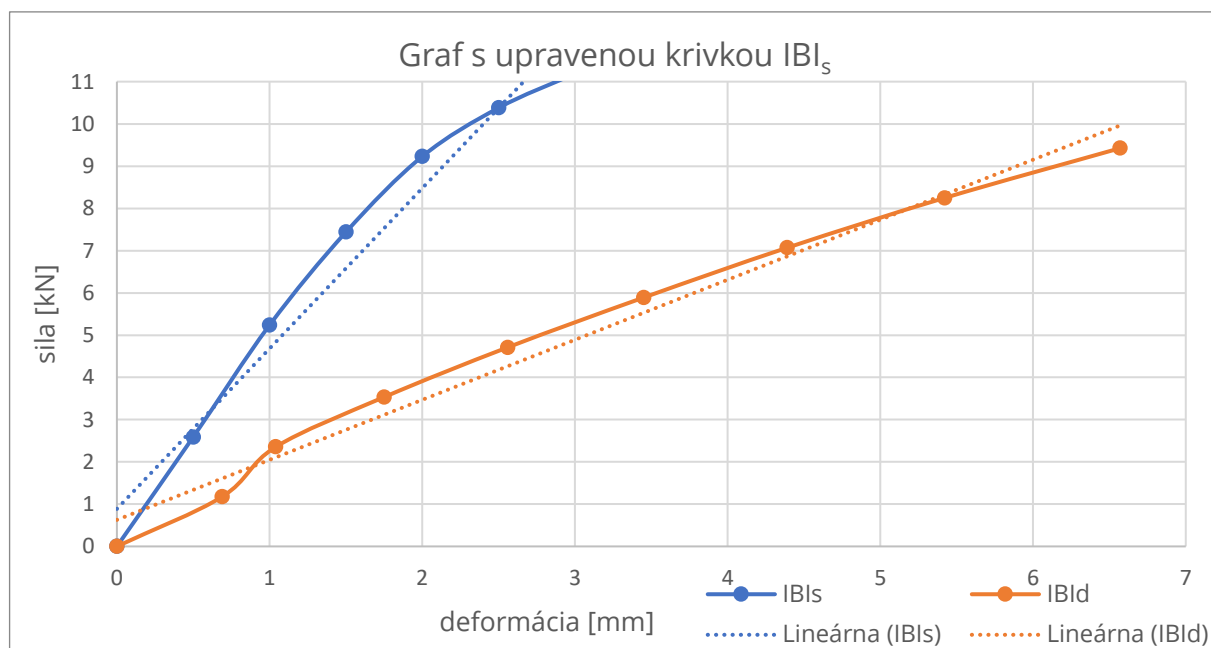
## 6.2 ZEMINA 2 – F6 CL

Pri Zemine 2 sa bude postupovať takisto ako pri Zemine 1 v kapitole 6.1.



Obr. 25 Graf porovnanie kriviek výsledkov statickej a dynamickej skúšky CBR Zemin 2

Krivka  $IBI_s$  nemá lineárny priebeh. Aby sme získali rovnicu preloženú priamky, skrátime meraný úsek danej krivky tak, aby sme dostali približne lineárny priebeh krivky. Preto krivku  $IBI_s$  ukončíme pri deformácii 2,5 mm (obr. 26).



Obr. 26 Graf s upravenými hodnotami

Pri zmene tvaru krivky by sa mala udávať aj hodnota deformácie, pre ktorú platí tvar priamky.

Po upravení krivky môžeme definovať preložené rovnice.

Lineárna  $IBI_s$ :  $y = 3,944 * x + 0,52$

Lineárna  $IBI_d$ :  $y = 1,428 * x + 0,61$

Tieto dve priamky sa stretli v bode [0,04 ; 0,66].

**Výsledná rovnica:**  $IBI_d = 0,66 + 0,362 * IBI$

### **Porovnanie výpočtov $IBI$ :**

Hodnota  $IBI_s$ : 80%

Hodnota  $IBI_d$ : 40%

Číselný údaj, ktorý sa použije pri vyhodnotení číselných výsledkov, bude podiel hodnoty  $IBI_s$  a hodnoty  $IBI_d$ .

$$\frac{IBI_d}{IBI_s} = \frac{40\%}{80\%} = 0,5 = 50\%$$

Pri porovnaní výsledkov zistíme, že sa opäť oveľa nelíšia. Takisto ako v predchádzajúcom prípade hodnota získaná výpočtom (50%) je o niečo väčšia, než hodnota získaná graficky (36,2%). Takisto ako v prípade Zeminy 1, sa za preukaznú metódu berie metóda grafická s rovnicou:

$$**$IBI_d = 0,66 + 0,362 * IBI$**$$

## **6.3. VÝSLEDKY POROVNANIA**

Z výsledkov môžeme určiť tieto závery:

- Dynamická skúška  $IBI_d$  môže byť použitá na posudok súdržných zemín, vďaka istému vzťahu medzi klasickou a dynamickou skúškou. Aby však malo zmysel robiť túto skúšku, je potrebné zmeniť druh skúšky s ohľadom na vysokú pracnosť (menšia vzorka zeminy).
- Pri používaní iných foriem na zhutnenie zeminy je žiadúce ponechať energiu zhutnenia zeminy na rovnakú na jednotku objemu.

- Dynamický test IBI sa môže vykonávať v laboratóriách s cieľom stanoviť hodnoty  $IBI_d$  pre zhutnené pôdy podľa špecifikovaných požiadaviek pre konkrétne typy zemných prác. Za daných podmienok v teréne môže byť stanovenie  $IBI_d$  hodnotené ako posudok zhutňovania zemín a následne porovnávané s hodnotami preddefinovanými v laboratóriu.
- Experimentná dynamická metóda stanovenia únosnosti by sa mala previesť pri optimálnej vlhkosti zeminy (skúška  $IBI_d$ ). Výsledky skúšky  $CBR_d$  na saturovanom vzorku boli nepreukazné.

## 6.4. DISKUSIA

V porovnaní so spomínanou skúsenosťou zo zahraničia (kap. 3.4), kde bol výsledok pokusu taktiež zapísaný pomocou rovnice v tvare:  $CBR_d = A + B * CBR$ ,

sa dá vyhlásiť, že výsledky práce sa zhodujú. Koeficienty  $B$  dosiahli v pokuse na niekoľkých vzorkách zeminy hodnoty od 0,5 do 0,66. Malý rozdiel medzi týmito výsledkami môže byť spôsobený inou metódou použitého dynamického zaťaženia.

Koeficienty  $A$  boli v pokuse značne vyššie oproti mojej práci. To môže závisieť na vlastnostiach použitej zeminy, resp. rôznych aditív. Meranie považujem za úspešné

## 7. ZÁVER

Po vyhodnotení praktickej časti je zrejmé, v akých rozmedziach sa pohybujú hodnoty korelačných súčiniteľov. Keďže v práci uvažujem, že doba priťaženia je zhodná s dobou odľahčenia, hodnota korelačných súčiniteľov pre súdržné zeminy sa bude pohybovať okolo čísla 0,5. Táto skúška môže byť, po ďalších vykonaných experimentoch v budúcnosti a po preddefinovaní hodnôt zemín, využívaná ako špeciálna laboratórna skúška. Dôležitý však je štatistický súbor výsledkov aspoň 50 skúmaných vzoriek konkrétneho typu zeminy na zistenie presného vzťahu.

Za základ tejto práce považujem korelačný vzťah medzi  $IBI$  a  $IBI_d$ . Samotná skúška sa však vzhľadom na svoju pracnosť bude musieť upraviť, pretože použitý postup ráta so zbytočne veľkým množstvom použitej zeminy, ktoré bolo v tejto skúške zvolené len kvôli možnosti vykonania väčšieho počtu skúšok.

## POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] [online]. Dostupné z:  
<https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/25062/01chapter1-3.pdf?sequence=2>
- [2] ČSN EN 13286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání. ICS 93.080.20, Praha: ÚNMZ, listopad 2012.
- [3] TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací. Ministerstvo dopravy České republiky, listopad 2004.
- [4] ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. ICS 93.080.20, Praha: ÚNMZ, listopad 2005.
- [5] Formy pro Proctorovou zkoušku. strojeprozskusebnictvi.cz [online]. Copyright © 2011, Polní 23 [cit. 23.05.2018]. Dostupné z: <http://www.strojeprozkusebnictvi.cz/formy-pro-proctorovou-zkousku.html>
- [6] ZABIELSKA-ADAMSKA, Katarzyna and SULEWSKA Maria J., "Dynamic CBR Test to Assess the Soil Compaction," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 43, No. 5, 2015, pp. 1028-1036, doi:10.1520/JTE20130256. ISSN 0090-3973

## ZOZNAM OBRÁZKOV

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Obrázok 1:  | Formy pre Proctorové skúšky [4].....                             | 13 |
| Obrázok 2:  | Vzorka zeminy v lise.....  | 14 |
| Obrázok 3:  | Grafické vykreslenie závislosti sily na penetráciu trňa [2]..... | 16 |
| Obrázok 4:  | Zemina hutnená do formy.....                                     | 19 |
| Obrázok 5:  | Skúšobné teleso v zaťažovacom prístroji.....                     | 20 |
| Obrázok 6:  | zlava – klasická skúška CBR, skúška LFWD.....                    | 21 |
| Obrázok 7:  | Výstupy z práce [5].....   | 22 |
| Obrázok 8:  | Graf - Sitový rozbor.....  | 26 |
| Obrázok 9:  | Trojuholníkový diagram.....                                      | 26 |
| Obrázok 10: | Graf – Určenie medze tekutosti.....                              | 27 |
| Obrázok 11: | Diagram plasticity.....  | 27 |



|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| Obrázok 12:      | Graf – Optimálna vlhkosť zeminy.....                                      | 29 |
| Obrázok 13:      | Graf – Skúšky IBI.....  | 30 |
| Obrázok 14:      | Skúška na saturovanej vzorke.....   | 31 |
| Obrázok 15 a 16: | Systém zaťaženia zeminy a rôzne možnosti odčítania deformácie.....        | 34 |
| Obrázok 17:      | Zadávacia tabuľka dynamickej skúšky.....                                  | 35 |
| Obrázok 18:      | Detail na odchýlkomer.....  | 36 |
| Obrázok 19:      | Zaťažovaná plocha vzorky zeminy.....                                      | 36 |
| Obrázok 20:      | Graf - Výsledky dynamických skúšok - Zemina 1.....                        | 37 |
| Obrázok 21:      | Graf - Výsledky dynamických skúšok - Zemina 2.....                        | 38 |
| Obrázok 22:      | Graf – Porovnanie výsledkov s rôznym počtom opakovaní.....                | 39 |
| Obrázok 23:      | Graf – Priebeh deformácie v čase.....                                     | 40 |
| Obrázok 24:      | Graf – Porovnanie výsledkov zo statickej a dynamickej skúšky IBI (1)..... | 42 |
| Obrázok 25:      | Graf – Porovnanie výsledkov zo statickej a dynamickej skúšky IBI (2)..... | 44 |
| Obrázok 26:      | Graf – Upravené hodnoty IBI.....  | 44 |

## ZOZNAM TABULIEK

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabuľka 1:  | Hodnoty CBR.....                                      | 12 |
| Tabuľka 2:  | Orientačné hodnoty CBR podľa typu podložia.....       | 12 |
| Tabuľka 3:  | Orientačné hodnoty CBR podľa skúšanej zeminy.....     | 12 |
| Tabuľka 4:  | Orientačné hodnoty IBI.....                           | 12 |
| Tabuľka 5:  | Zaokrúhľovanie hodnôt CBR/IBI.....                    | 16 |
| Tabuľka 6:  | Sitový rozbor.....                                    | 25 |
| Tabuľka 7:  | Výsledky Modifikovanej Proctorovej skúšky.....        | 29 |
| Tabuľka 8:  | Výsledky skúšok IBI.....                              | 30 |
| Tabuľka 9:  | Tabuľka skúšky CBR <sub>d</sub> – Zemina 1.....       | 37 |
| Tabuľka 10: | Tabuľka skúšky CBR <sub>d</sub> – Zemina 2.....       | 38 |
| Tabuľka 11: | Záznam deformácií pri skúške so 100 opakovaniami..... | 39 |